



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO DE LA ZONA OCCIDENTAL
SABANA DE BOGOTÁ CON ADICIÓN DE CAL HIDRATADA COMPARANDO
MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS Y SEMIEMPÍRICO

PRESENTADO POR:
ANDRES CAMILO CHOCONTÁ OSUNA CÓDIGO:506534

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA D.C
2020



ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO DE LA ZONA OCCIDENTAL
SABANA DE BOGOTÁ CON ADICIÓN DE CAL HIDRATADA COMPARANDO
MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS Y SEMIEMPÍRICO

PRESENTADO POR:
ANDRÉS CAMILO CHOCONTÁ OSUNA CÓDIGO:506534

DIRIGIDO POR:
MARIO ALEXANDER CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA D.C
2020



Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Advertencia.

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia



Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

BOGOTA D.C.

DEDICATORIA

Dedico de manera especial este trabajo de grado a mi madre, a mi padre, a mis hermanos y a mis abuelos que son personas que me han ofrecido amor y calidez humana, me han brindado valores y actitudes para lograr la capacidad de superarme. Gracias por su presencia y apoyo ya que han sido los partícipes de este logro. Me formaron con valores fundamentales para mi vida personal y profesional, como también me motivaron constantemente para alcanzar mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mi familia, por acompañarme en cada paso que doy, por sonreír ante mis logros que son resultado de tu ayuda y por estar presente en esta gran etapa importante para mi vida.

A mis docentes por cada enseñanza llena de amor y entrega, por cada clase llena de aprendizaje.

A mi tutor Mario Castañeda por apoyarme desde un principio con la elección de nuestro tema a trabajar y por guiarnos durante el transcurso del desarrollo del mismo.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	4
1.1 ANTECEDENTES	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. ENTORNO GEOLÓGICO.....	8
2.2. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA SABANA DE BOGOTÁ 2010	10
2.3 PERFILES ESTRATIGRÁFICOS TÍPICOS	11
2.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS.....	16
2.5 CAL	18
2.7 ESTABILIZACIÓN SUELOS ARCILLOSOS CON CAL	20
2.8 DOSIFICACIONES DE CAL EN ARCILLAS.....	22
2.9 TEORÍAS DE CAPACIDAD DE CARGA	24
2.10 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	25
3. ESTADO DEL ARTE.....	28
3.1 CARACTERIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO TRATADO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO.....	28
3.2. ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO CON CAL Y CENIZA VOLANTE	29
3.3 A NUMERICAL AND ANALYTICAL STUDY ON THE BEARING CAPACITY OF TWO NEIGHBORING SHALLOW STRIP FOUNDATIONS ON SAND ...	30
3.4. EFFECTS OF LIME ADDITION ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SEDIMENTARY SOIL IN CURITIBA	31
3.5. VARIABLES GOVERNING STRENGTH OF COMPACTED SOIL–FLY ASH–LIME MIXTURES	32
4. OBJETIVOS.....	33
4.1 OBJETIVO GENERAL	33
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	34
5.1 ALCANCES	34

5.2 LIMITACIONES	34
6. METODOLOGÍA	35
6.1. DOCUMENTACIÓN LITERARIA PARÁMETROS DE RESISTENCIA SUELO NATURAL	37
6.2. DOCUMENTACIÓN LITERARIA PARÁMETROS DE RESISTENCIA SUELO DOSIFICADO CON CAL	37
6.3. MODELACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS DE SUELO	38
6.4. OBTENCIÓN DE CAPACIDAD TERZAGHI	43
6.5. COMPARACIÓN FEM VS MODELOS SEMI EMPÍRICOS	43
7. RESULTADOS.....	44
7.1 DOCUMENTACIÓN LITERARIA ESTUDIOS DE SUELOS	44
7.1.1 ESTUDIO DE SUELOS 1	44
7.1.2 ESTUDIO DE SUELOS 2	46
7.1.3 ESTUDIO DE SUELOS 3	48
7.2 DOCUMENTACIÓN LITERARIA ESTUDIOS DE ESTABILIZACIÓN CON CAL HIDRATADA.....	52
7.3. MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	55
7.4 OBTENCIÓN DE CAPACIDAD PORTANTE TEÓRICA POR MÉTODO SEMIEMPÍRICO.....	61
7.5 COMPARACIÓN FEM VS TERZAGHI.....	63
8. CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXOS.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción clasificación de suelos geológicos en la zona norte de la sabana de Bogotá.....	8
Tabla 2. Zonas de respuesta sísmica en zona de estudio	10
Tabla 3. Comparación de estratos estratigráficos elegidos	12
Tabla 4. Estación colegio Laureano Gómez,	13
Tabla 5. Perfil estratigráfico estación jardín botánico,.....	14
Tabla 6. Perfil típico estratigráfico estación parque la florida,	15
Tabla 7. Estabilizantes propuestos para suelos finos,	16
Tabla 8. Comparación de productos estabilizantes con base en cal aérea	19
Tabla 9. Especificaciones de la CAL hidratada,.....	19
Tabla 10. Ficha técnica estudio caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio	28
Tabla 11. Ficha técnica estudio estabilización de un suelo con cal y ceniza volante	29
Tabla 12. Ficha técnica A Numerical and Analytical Study on the Bearing Capacity of Two Neighboring Shallow Strip Foundations on Sand	30
Tabla 13. Ficha técnica effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in curitiba.....	31
Tabla 14. Ficha técnica de variables governing strength of compacted soil–fly ash–lime mixtures	32
Tabla 15. Metodología del proyecto.....	36
Tabla 16. Descripción estudio de suelos 1	44
Tabla 17. Perfil estratigráfico estudio de suelos 1.....	45
Tabla 18. Nivel freático estudio de suelos 1	45
Tabla 19. Información estudio de suelos 2	46
Tabla 20. Perfil estratigráfico estudio de suelos 2.....	47
Tabla 21. Información estudio de suelos 3	48
Tabla 22. Perfil estratigráfico estudio de suelos 2.....	48
Tabla 23. Resultados simulación ensayo triaxial suelo natural	51
Tabla 24. Resumen papers o artículos de estabilización con cal indagados	52
Tabla 25. Capacidad de carga última teórica por medio de FEM	59
Tabla 26. Capacidad de carga admisible teórica por medio de FEM.....	60
Tabla 27. Capacidad de carga última teórica por medio de Terzaghi	61
Tabla 28. Capacidad de carga admisible teórica por medio de Terzaghi	62
Tabla 29. Capacidad de carga valores comparativos	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa geológico con de Bogotá 2015.....	9
Figura 2. Ubicación perfiles estratigráficos dentro de localidad Engativá,	11
Figura 3. Clasificaciones de la cal en la construcción según UNE EN 459-1 .2001	18
Figura 4. Cantidades recomendadas de cal para la estabilización de subrasantes y bases	22
Figura 5. Elementos de un modelo de elementos finitos	25
Figura 6. Tipos de modelos según los elementos.....	26
Figura 7. Puntos de tensión según tipos de modelos	26
Figura 8. Puntos de tensión en modelo de elementos finitos.....	27
Figura 9. Flujograma del proyecto	35
Figura 10. Determinación de límites de frontera	38
Figura 11. Modelo geométrico de la zapata en Plaxis	39
Figura 12. Tabla de propiedades de suelo general.....	39
Figura 13. Ventana de ingreso de propiedades de suelo específico.....	40
Figura 14. Lista de materiales en simulación 1	40
Figura 15. Suelo asignado y cargas activadas en el modelo	41
Figura 16. Generación de la malla	41
Figura 17. Nivel freático	42
Figura 18. Presión de poros.....	42
Figura 19. Esfuerzos efectivos.....	42
Figura 20. Puntos de referencia.....	42
Figura 21. Fases de análisis de la modelación	42
Figura 22. Propiedades del suelo natural	50
Figura 23. Propiedades del suelo 3% cal.....	54
Figura 24. Propiedades del suelo 5% cal.....	54
Figura 25. Desplazamientos totales de zapata 2m x 2m suelo natural	55
Figura 26. Esfuerzos efectivos para zapatas 2mx2m en suelo natural	56
Figura 27. Gráfica de deformación VS carga para zapata cuadrada de 2m x 2m con suelo natural.....	56
Figura 28. Gráfica de deformación VS carga para zapata cuadrada de 2m x 2m con 3% cal	57
Figura 29. Gráfica de deformación VS carga para zapata cuadrada de 2m x 2m con 5 % cal	58
Figura 30. Gráfica de deformaciones VS carga para los suelos estudiados.....	58
Figura 31. Capacidad de carga última VS base a diferentes dosificaciones de cal	59
Figura 32. Capacidad de carga admisible VS base a diferentes dosificaciones de cal	60

Figura 33. Capacidad de carga ultima VS base a diferentes dosificaciones de cal	61
Figura 34. Capacidad de carga admisible VS base a diferentes dosificaciones de cal	62
Figura 35. Carga VS deformación para zapata cuadrada de 2mx2m suelo natural	63
Figura 36. Carga VS deformación para zapata cuadrada de 2mx2m suelo 3% de cal	64
Figura 37. Carga VS deformación para zapata cuadrada de 2mx2m suelo 5% de cal	64
Figura 38. Comparación valores de capacidad portante.....	65
Figura 39. Comparación capacidad de carga admisible VS base a diferentes dosificaciones de cal.....	66

RESUMEN

El siguiente trabajo va a abordar la variación de la capacidad portante del suelo de arcillas de alta compresibilidad de la sabana de Bogotá, debido a que en este lugar se pueden encontrar grandes zonas con arcillas de bajas capacidades portantes y grandes asentamientos.

Para eso se realizó simulaciones y recopilación de datos bibliográficos, con el fin de saber la capacidad portante del suelo y así mejorar y/o variar los parámetros de resistencia, al adicionar un contenido aglutinante de cal hidratada, puesto que es usada comúnmente para secar, aglomerar y modificar las propiedades de los suelos, por su facilidad de adquisición y manejo.

Por lo cual, en primer lugar se realizó una documentación bibliográfica de estudios que trataban sobre las propiedades físicas y mecánicas de las arcillas en el occidente de la sabana de Bogotá, siendo más específicos en las localidades de Suba, Usaquén y Engativá, puesto que en la mayoría de su territorio se encuentran dos zonas geotécnicas: lacustres A y lacustre B, que a su vez se subdividen en tres zonas de respuesta sísmica: lacustre 300, lacustre 200 y lacustre 500 (IDIGER & Alcaldía Mayor de Bogotá (2010)). Igualmente se buscó en papers artículos que abordan investigaciones de suelos de arcilla con alta plasticidad que habían sido tratados con cal hidratada.

Lo anterior se recolectó para determinar los parámetros de resistencia de un suelo arcilloso de alta plasticidad, con el fin de encontrar una relación entre los datos obtenidos en los suelos bogotanos y las diferentes fuentes, para poder establecer cómo variar las propiedades de un suelo natural, con respecto al suelo estabilizado con cal hidratada.

En segundo lugar, se determinó la capacidad portante enmarcando en el contexto de cimentaciones superficiales, en condiciones no drenadas no consolidadas, en un suelo saturado, para un desplante de cero y se determinó el cambio de la capacidad portante después de someterse a un proceso de estabilización con cal hidratada. Dicha capacidad de carga se calculó por medio de FEM (Método de elementos finitos) y por la ecuación de capacidad de carga de Terzaghi.

En definitiva, al tener los resultados de cada método, se pudo establecer sus ventajas y desventajas particulares. Para así determinar la variación de capacidad portante de la cimentación superficial en los suelos arcillosos en función de cal hidratada.

INTRODUCCIÓN

Para iniciar el análisis de la variación de la capacidad portante del suelo de arcillas de alta compresibilidad se estudiaron los suelos de la sabana de Bogotá, de acuerdo con el decreto 523 de 2010, que define la microzonificación y zonas de respuesta sísmica. En donde se encontraron diferentes tipos de suelos como: rellenos de basuras o de excavación, suelos residuales, suelos blandos, piedemonte, roca, arcillas blandas, entre otros.

En la zona de las localidades escogidas: Suba, Usaquén y Engativá, se descubrió que en su mayoría tiene dos zonas geotécnicas, que son definidas según el espesor de los estratos y tipos de depósitos que se encuentran en cada una, es decir, que sus suelos son arcillosos y tienen baja a media capacidad portante.

Con relación a la estabilización de las arcillas se hizo uso de cal, que es un material empleado para la modificación y estabilización de suelos arcillosos, ya que las arcillas de Bogotá en general tienen un índice de plasticidad mayor a 10 y la granulometría particular de la arcilla (granos finos).

La relación entre la arcilla y la granulometría se hizo necesario para la reacción con la cal, al entender el proceso como la aglomeración de partículas, el intercambio iónico de cationes de hidróxido de calcio por aniones del suelo, la reacción puzolánica de cementación y la carbonatación. Según Castelló Bauzá, (2003) la adición de cal "*genera una estructura química más compacta a su vez generando cambios en el tamaño de las partículas, capacidad portante y compacidad de estos suelos*". Por lo tanto, este material es ideal para realizar la estabilización del suelo.

Así mismo, para determinar la capacidad portante del suelo antes y después de la estabilización con cal hidratada, se hizo uso de las teorías de capacidad de carga de Terzaghi y FEM, para realizar la comparación entre estas. Una vez determinado los parámetros de diseño de suelo natural y estabilizado se realizaron modelaciones determinando la capacidad portante, haciendo uso de la metodología de modelado por elementos finitos y con métodos antes mencionados.

El estudio fue limitado al análisis de zapatas cuadradas 800 kN, ya que es la carga máxima para edificaciones de categoría baja, en un suelo saturado siendo la condición más crítica de carga y la cual representa las condiciones reales del suelo; adicional está en condiciones no drenadas, no consolidadas y confinadas.

Se realizó este estudio para poder determinar la variación de la capacidad de carga para cimentaciones superficiales de un suelo arcilloso de la sabana de Bogotá, como función del contenido de cal hidratada adicional determinando las ventajas o desventajas, de las metodologías de modelación de elementos finitos respecto a Terzaghi.

En función de lo expuesto anteriormente y con fin de darle seguimiento a la problemática planteada; se realizó la documentación bibliográfica de los datos pertinentes a la caracterización física y mecánica de suelo arcilloso de la sabana de Bogotá, también se realizó una documentación bibliográfica de estudios en los cuales se haya estabilizado arcillas con cal hidratada; con fin de determinar un suelo con propiedades similares y poder establecer el comportamiento de las arcillas de la sabana de Bogotá cuando se estabilice con cal hidratada.

1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Para la estabilización de los suelos, la cal ha sido un componente muy útil, debido a que se ha utilizado a través de los años en construcciones que han marcado la historia, ya que este material genera mayor estabilidad, durabilidad, plasticidad y resistencia en la estructura, lo que hace posible utilizarla no solo por su duración, también por su bajo costo y bajo daño medioambiental.

En diferentes estudios como en la caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio en el cual se indica que” El suelo genera una capacidad cementante en el material resultante y se demostró que el hidróxido de calcio, es muy útil en la estabilización de suelos arcillosos ya que genera cambios significativos en sus propiedades físico-mecánicas y químicas del suelo y en el cual genera que sean óptimas para la utilización en las estructuras de pavimentos.” (Higuera Sandoval, Gómez Cristancho, & Pardo Naranjo, 2012)

O estudios usando cal viva en la cual se puede “observar que independientemente del porcentaje de adición de cal viva, fue notorio el aumento de la resistencia en dichos cuerpos de prueba, lo que permite ratificar la versatilidad de este material en la estabilización de tipo química en los suelos con altos contenidos de arcilla.” (Gómez, 2018)

Adicionalmente la estabilización con cal hidratada ha sido reglamentada por el INVÍAS en las especificaciones generales de construcción de carreteras en la cual se habla de “*el mejoramiento de los suelos de subrasante mediante su mezcla homogénea con cal hidratada*” en la cual se establece en qué tipo de suelo se puede hacer la estabilización, las propiedades de la cal a utilizar e incluso las propiedades del agua.

También se establece cómo determinar el porcentaje óptimo de la cal haciendo uso de la norma de ensayo INV e 606 la cual es basada del método de Eades y Green en el cual en función del cambio del pH se para la adopción de un porcentaje óptimo.

Así mismo se habla de una verificación de los resultados por medio de la resistencia a la compresión confinada que debe tomar el suelo como mínimo teniendo que se debe tomar cuatro probetas que representen a cada lote y que la resistencia media de estas, debe ser igual o superior al 92 % de la resistencia

de diseño y también cada probeta debe tener como mínimo el 90 % de la resistencia de diseño.

También hay que denotar que se han hecho estudios de estabilización de arcillas en las cuales se hace uso de diferentes metodologías como el método gráfico de AASHTO o el método de Eades y Grim para obtener el porcentaje óptimo de cal y que el invias hace uso del método de Eades y Grimm.

La National Lime Association por otro lado se centró en identificar los cambios que sucedían al momento de mezclar la cal con el suelo estableciendo que hay tres procesos en los cuales se puede definir el proceso de reacción químico de la cal con el suelo los cuales son secado, modificación y estabilización. Que por cada uno de ellos se agrupan subprocesos como la hidratación de las partículas de hidróxido de calcio o el intercambio de los iones del suelo con los aniones de la cal.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Este trabajo se justifica en la medida de la hipótesis del incremento de la capacidad de carga, al momento de dosificar el suelo a un porcentaje de cal, con fin de reducir volúmenes de excavación, dimensiones de la cimentación, brindando un mejor apoyo a estructuras en suelos arcillosos.

Comúnmente los suelos arcillosos bogotanos a tratar se caracterizan por tener capacidades portantes de medias a bajas, índices de plasticidad altos, a verse en grandes estratos, con niveles freáticos que van desde los 3 a los 8 metros y a ser muy compresibles como se mencionó anteriormente; como las propiedades geotécnicas de estos suelos no son buenas, es costoso realizar diferentes estructuras, a lo que es una opción a tener en cuenta el estabilizar los suelos.

Con el fin de determinar qué propiedades mecánicas se alteran, a su vez determinando cambios en la capacidad portante, teniendo como marco que son cimentaciones superficiales y que se van a determinar la capacidad de carga por Terzaghi y por FEM.

Establecer el cambio en los parámetros de resistencia como producto del proceso de estabilización; para facilitar la construcción de diferentes obras, además, apoyar estructuras de mayor peso en cimentaciones superficiales, reduciendo costos y generando una mayor durabilidad en las obras. Se hará uso cal hidratada, el cual en el contexto de la construcción colombiana es el material idóneo, ya que no requiere mayores medidas de seguridad y a pesar de que se requiere una mayor cantidad que la cal viva, incurre en menores costos ya que no necesita de una mano de obra capacitada, ni hay riesgos de accidentes laborales por su naturaleza. Ya que el suelo que se va a modelar es una arcilla se hará uso de cal hidratada.

Haciendo uso de los instrumentos tecnológicos se podrá evaluar la capacidad portante del suelo arcilloso con las propiedades documentadas por medio de elementos finitos representando un contexto en el cual se pueden hacer diferentes pruebas a diferentes condiciones.

También se genera la posibilidad de estudiar mayor número de hipótesis y reducirá la probabilidad de errores manuales en la ejecución de los laboratorios generando una mayor confianza en este estudio, a su vez brindando la capacidad de evaluar con mayor veracidad y aprovechar el conocimiento que se tienen actualmente sobre la estabilización con cal.





Teniendo en cuenta todos los aspectos anteriormente mencionados se formuló la pregunta a la cual se le intentará dar respuesta en este trabajo ¿cómo varía la capacidad de carga para cimentaciones superficiales de un suelo arcilloso de la sabana de Bogotá, como función del contenido de cal hidratada?.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ENTORNO GEOLÓGICO

Se realizó el análisis de la naturaleza de los suelos de las zonas que se van a tomar como zonas críticas para el desarrollo de este trabajo por lo que se obtiene que en la zona norte y noroccidental hay cuatro unidades cronoestratigráficas según el servicio geológico colombiano y son pertinentes a este trabajo los cuales son:

Tabla 1. Descripción clasificación de suelos geológicos en la zona norte de la sabana de Bogotá

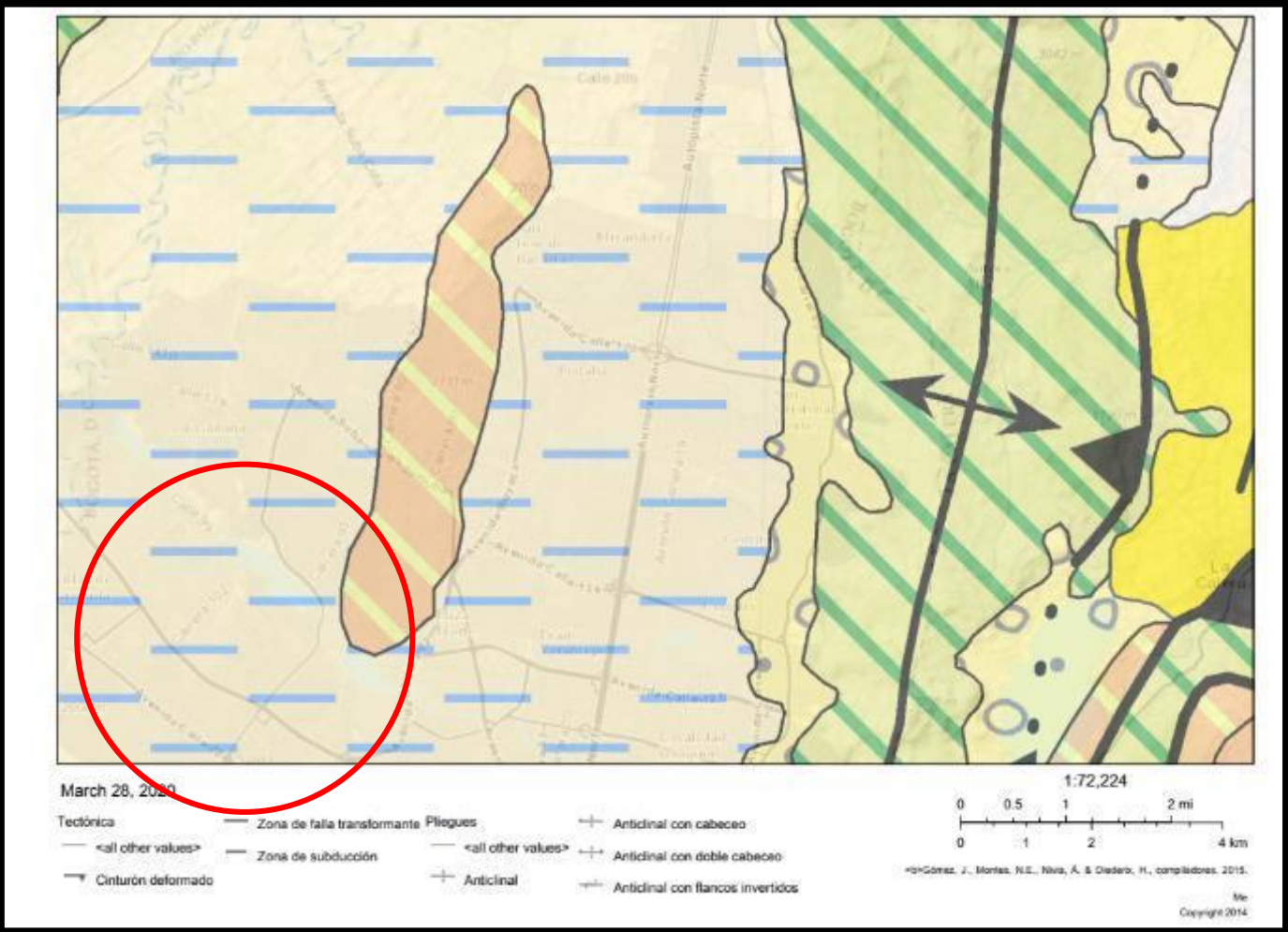
Leyenda	Descripción
 Q1-l	Se encuentra en la mayor parte de la zona norte y noroccidental de la sabana de Bogotá y se define que es un suelo de arcillas, turbas, y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas.
 b6k1-Stm	Se encuentra a las afueras de la ciudad de la zona nororiental y se define que es un suelo de Cuarzo arenitas de grano grueso a conglomeríticas con niveles de lodolitas.
 e6e7-Stm	Se encuentra en la zona entre las calles 80 y calle 200 y entre la avenida Boyacá y avenida suba, se define que es un suelo de Conglomerados, arenitas lodosas líticas, cuarzo arenitas, limolitas, shales y carbones.
 Q1-ca	Se encuentra entre la 200 y la 26 a lo largo de la 7ma y se determina que son Abanicos aluviales disectados con suelos de matriz rocosa fracturada.

Fuente: IGAC

Según la Figura 1 se muestra cómo se distribuyen las zonas expuestas anteriormente en las localidades de Engativá, Suba y Usaquén, la zona de estudio se definirá como la localidad de Engativá resaltada con el círculo rojo y se puede llegar a la conclusión que por su composición geológica es pertinente recopilar estudios de suelos de la localidad de Engativá.

Determinando que la unidad cronoestratigráfica Q1- I tiene la naturaleza del suelo elegido donde se puede realizar la recopilación bibliográfica en gran parte de la zona norte de Bogotá desde la 80 hasta las afueras y en la casi totalidad de la zona noroccidental y al ser suelos provenientes de un depósito aluvial se esperará encontrar arcillas con presencias bajas de arenas y gravas (SGC, 2015).

Figura 1. Mapa geológico con de Bogotá 2015.



UNIDADES CRONOESTRATIGRÁ FICAS	
•	Q1-I
•	b6k1-Stm
•	e6e7-Stm
•	Q1- ca

Fuente: SGC

2.2. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA SABANA DE BOGOTÁ 2010

Haciendo uso de la clasificación de zonas geotécnicas de la microzonificación sísmica de la sabana de Bogotá en el norte y noroccidental se encuentran diferentes suelos como lacustres A, lacustres B, piedemontes A, cerros A, depósitos de ladera, rellenos, basuras y a continuación se describirán los suelos más relevantes en dichas zonas (FOPAE & Alcaldía Mayor de Bogotá, Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C, 2010):

- Lacustre A: el cual es un suelo muy blando, de una terraza alta lacustre, de arcillas limosas muy blandas, de capacidad portante de muy baja a media y muy compresibles; y ubicados en la gran parte de la zona a estudiar.
- Lacustre B: el cual es un suelo blando, de una terraza alta lacustre, de arcillas limosas blandas, de capacidad portante de muy baja a media y muy compresibles; y ubicados en la periférica de la ciudad.

Las cuales se encuentran en la mayor parte de la zona norte y noroccidente de la sabana de Bogotá como se muestra en la ANEXO 1 Y según los cuales se encuentra que en estas zonas hay arcillas de consistencia blanda a muy blanda, de muy alta compresibilidad y que tienen una capacidad portante de media a baja.

Se agruparon los suelos según la respuesta que tendrían los suelos de Bogotá ante un evento sísmico, y dentro de los más relevantes para este proyecto por sus propiedades se encuentran en la

Tabla 2.

Tabla 2. Zonas de respuesta sísmica en zona de estudio

Zona	Estratos de Arcillas
Lacustre 500	300-500 m
Lacustre 300	200-300 m
Lacustre 200	100-200 m

Fuente: Propia

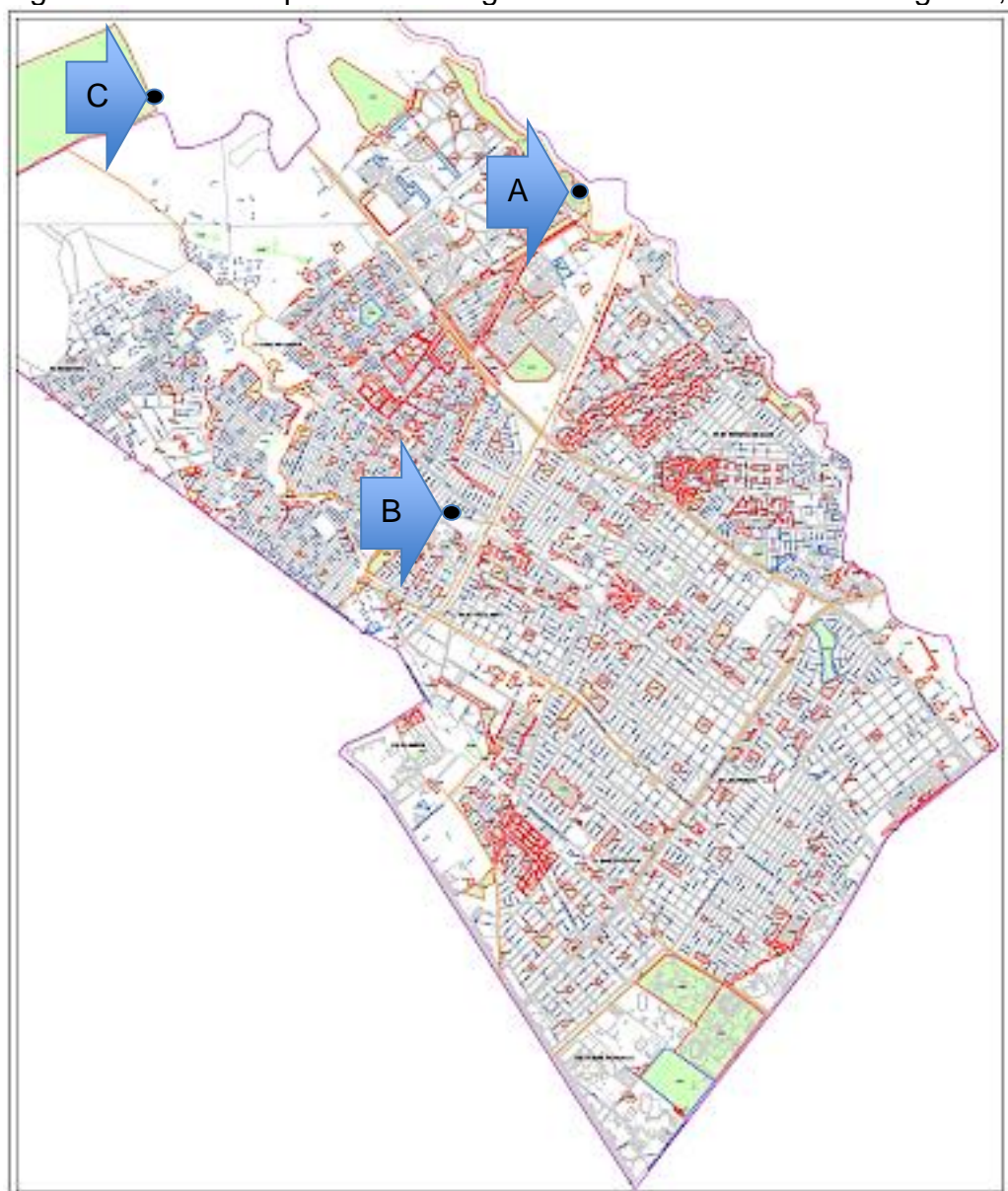
Y de los cuales en los tres casos son suelos lacustres blandos, con presencia de arcillas limosas o limos arcillosos y una humedad promedio a 50 m de >80%. Y distribuidos como se muestran en el ANEXO 2.

Se puede interpretar que las zonas lacustres B en gran parte se pueden clasificar como lacustres 500 y las lacustres A se dividirán en lacustres 500, 300 y 200; y también dentro de la zona a estudiar marcada con rojo dentro del ANEXO 1, los estratos de arcilla son mayores a 200 m con presencia de humedales por lo que se tendrán humedades relativamente altas.

2.3 PERFILES ESTRATIGRÁFICOS TÍPICOS

En la sabana de Bogotá se encuentran treinta estaciones de acelerógrafos para permitir obtener datos representativos de una respuesta sísmica de los suelos de Bogotá; De estas estaciones veinte se encuentran en la planicie de la ciudad dentro de las cuales hay trece en las zonas lacustres. Se eligieron tres de estas marcadas con un punto negro que se encuentran en la zona de estudio o a sus alrededores que se distribuyen como se muestran en la Figura 2. (FOPAE, Procesamiento e Interpretación De Señales De La Red De Acelerógrafos De Bogotá 2009 A 2011, 2011).

Figura 2. Ubicación perfiles estratigráficos dentro de localidad Engativá,



Fuente: Alcaldía Mayor De Bogotá D.C 2012.

Los trece perfiles caracterizados que se agrupan dentro de la zona norte y noroccidente se agruparon tres perfiles típicos los cuales son correspondientes a la zona lacustre de arcillas de consistencia blanda a media, a una zona aluvial de arenas de baja plasticidad y una zona de transición entre estas.

Se determinó y se comparó la caracterización de las arcillas de tres estaciones según su ubicación uno en el parque la florida, otro en el colegio Laureano Gómez y por último uno en el jardín botánico puntos que están dentro de la localidad de Engativá y se caracterizan generalmente como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de estratos estratigráficos elegidos

Estación	Descripción	W (%)	IP	γ (kN/m ³)
A. CLAGO	Estrato de 300 m de arcillas con nivel freático a tres metros de los cuales se caracterizaron 250 m	0-72 m 65<W>195	0-72 m 40<IP>130	12.18 < γ > 19.39
		72-250 m 35<W>59	72-250 m 20<IP>50	
B. CJABO	Estrato de 300 m de arcillas con nivel freático a tres metros y medio de los cuales se caracterizaron 275 m	0-58 m 45<W>142	0-58 m 45<IP>122	13.05 < γ > 20.31
		58-275 m 25<W>74	58-275 m 16<IP>60	
C.CFLOG	Estrato de 500 m de arcillas con un nivel freático a tres metros con la suposición de los 500 metros de arcillas	0-110 m 50<W>150	0-110 m 40<IP>130	13.03 > γ < 20.31
		110-500 m 25<W>41	110-500 m 20<IP>50	

Fuente: Propia

A partir de lo anterior, es posible indicar la predominancia de suelos blandos y de bajo peso unitario en el área de estudio. Así mismo, se denotan altos niveles freáticos, evidenciados en la presencia de humedales.

A continuación, son presentados los perfiles reportados por IDIGER en el estudio de referencia:

A. Estación colegio Laureano Gómez (CLAGO)

Se encuentra en una zona lacustre 300 y Para este perfil se propone un depósito de 250 metros de arcillas en el cual se encontró nivel freático a los tres metros de profundidad y se caracterizaron diez materiales como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Estación colegio Laureano Gómez,

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 3	Relleno	65	62	16.28
3 a 14	Limo amarillo orgánico a la base	142	96	13.09
14 a 23	Arcilla limosa gris a café	195	173	12.18
23 a 39.5	Arcilla gris a café con turba a la base	128	99	13.32
39.5 a 72	Arcilla algo limosa gris verdosa a café	97	76	14.46
72 a 90	Arcilla limosa gris verdosa a café	59	51	15.87
90 a 110	Arcilla limosa gris marrón a arcilla arenosa gris verdoso	40	43	17.17
110 a 135	Arena muy fina ligeramente arcillosa gris verdosa	30	23	18.81
135 a 155	Arcilla limosa gris	40	39	15.30
155 a 250	Arcilla café	35	42	19.39

Fuente: Idiger

De la Tabla 3 Se puede deducir que hay similitud en depósitos a la estación del jardín botánico, pero tiene unos valores típicos de peso específico menores mientras índice de plasticidad y humedades mayores.

Los tres perfiles presentan rellenos heterogéneos en los dos o tres primeros metros que es donde se realizará la documentación bibliográfica de los estudios de suelos. Y a partir de este se encuentran en su mayoría arcillas gris, marrones cafés y verdosas que podrían indicar los minerales que tienen estas arcillas; con intercalaciones de limos y arenas.

B. Estación jardín botánico (CJABO)

Se encuentra en una zona lacustre 300 y Para este perfil se propone un depósito de 275 metros de arcillas en el cual se encontró nivel freático a los 3,5 metros y se caracterizaron doce materiales como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Perfil estratigráfico estación jardín botánico,

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom. (%)	IP Prom	γ (kN/m ³)
0 a 2.5	Rellenos superficiales heterogéneos	45	45	17.34
2.5 a 8	Arcilla gris con intercalaciones carmelitas	113	108	14.63
8 a 18	Arcilla limosa gris marrón	142	122	13.33
18 a 30	Arcilla ligeramente limosa marrón a gris	121	118	13.05
30 a 40	Arcilla limosa gris amarillento	108	91	13.51
40 a 58	Arcilla algo limosa gris marrón con turba	83	83	14.33
58 a 70	Arcilla limosa y/o limo arcilloso con intercalaciones de arena	38	33	18.68
70 a 90	Arcilla limosa gris oscuro con intercalaciones de arena	74	60	15.63
90 a 159.5	Intercalaciones de arena fina con arcilla limosa gris oliva	30	24	18.23
159,5 a 240	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	25	16	19.69
225 a 240	Arena de grano fino ligeramente arcillosa marrón	28	16	20.31
240 a 275	Arcilla arenosa marrón	41	51	17.56

Fuente: Idiger

De la Tabla 5 se puede decir que tiene similitudes tanto en índices de plasticidad como en humedades a la estación de la florida la diferencia radica en que hay estratos más grandes de arcillas limosas o intercalaciones de limo.

C. Estación parque de la florida (CFLOD)

Para este perfil se propone un depósito de 500 metros de arcillas, con un nivel freático a 3.0 m de profundidad divididos en 14 estratos como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Perfil típico estratigráfico estación parque la florida,

Profundidad (m)	Descripción	Wn prom. (%)	IP Prom.	γ (kN/m ³)
0 a 3	Relleno heterogéneo	53	65	16.28
3 a 7	Arcilla gris oscura con intercalaciones de arena	25	12	19.13
7 a 10	Arena gris a café medio suelta	22	4	17.17
10 a 28	Arcilla café con intercalaciones de material orgánico	142	130	13.03
28 a 40	Arcilla marrón	115	101	13.35
40 a 70	Arcilla gris	97	88	14.11
70 a 90	Arcilla marrón a gris oliva	79	67	15.13
90 a 110	Arcilla limosa gris verdosa con intercalaciones de arena limosa bien densa	44	46	17.17
110 a 132	Arena arcillosa de grano fino marrón	29	20	19.36
132 a 147	Arcilla gris oliva	34	30	17.17
147 a 159.5	Arena arcillosa de grano fino marrón	35	35	15.30
159.5 a 225	Arcilla limosa gris a marrón con lentes de arena	25	15	19.63
225 a 240	Arena de grano medio a fino marrón con intercalaciones de arcilla	28	16	20.31
240 a 500	Arcilla arenosa marrón	41	51	17.56

Fuente: Idiger

De la

Tabla 6 se puede definir que en la estación de la florida en su mayoría son estratos de arcilla con pequeñas intercalaciones de limos, de arena y de contenido orgánico, adicional que hay estratos de hasta treinta metros de arcillas gris lo que podrían ser arcillas expansivas.

2.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS

La estabilización de suelos es el proceso de aplicación de una serie de elementos físicos y químicos, con el fin de obtener una mejora en las características de dicho suelo, teniendo en cuenta el suelo problema y haciendo uso de la metodología actualmente empleada en el país se clasifica como suelo de área tres; que son suelos finos con índices de plasticidad altos. Esta metodología es la habitualmente empleada en el país y permite clasificar el suelo con fines de estabilización a partir de los contenidos de grava, arena y finos, y los resultados de plasticidad, por lo que para suelos del área tres puede hacer uso de diferentes aditivos como lo son (Department & Department Of The Army, 1994):

- suelo-cemento
- suelo-cal
- suelo-cenizas-cal-cemento

Para cada tipo de suelo dependiendo el grupo se proponen diferentes tipos de estabilizantes; que a su vez presentan limitaciones por plasticidad y granulometría con fin de elegir el estabilizante que mejor se ajuste para las propiedades del suelo a estabilizar.

Este trabajo se enfocará en el suelo del área tres suelos finos clasificados a los cuales se proponen los estabilizantes:

Tabla 7. Estabilizantes propuestos para suelos finos,

SUELO	ESTABILIZANTE PROPUESTO	RESTRICCIÓN LL & IP	OBSERVACIONES
CH, CL, MH, ML.	SUELO-CEMENTO	IP <40 LL <40	Suelos orgánicos y suelos con contenido de ácido no son susceptibles a métodos ordinarios de estabilización.
	SUELO-CAL	CAL IP>12	

Fuente: Department Of The Army 1994.

Teniendo en cuenta que los materiales predominantes en el área de estudio corresponden a arcillas, con IP mayores a 40 como se puede apreciar en la Tabla 3 se descarta el uso de cemento y se determina que la cal es la mejor opción.

Factores condicionantes estabilización de suelos arcillosos

Con el fin de controlar todos los factores en busca de la garantía de la mejora de los suelos arcillosos, se definen diferentes factores que se deducen a partir de los mecanismos de interacción de la cal con la arcilla; además de factores externos que también podrían afectar el proceso y es preciso considerarlos (Castelló Bauzá, 2003).

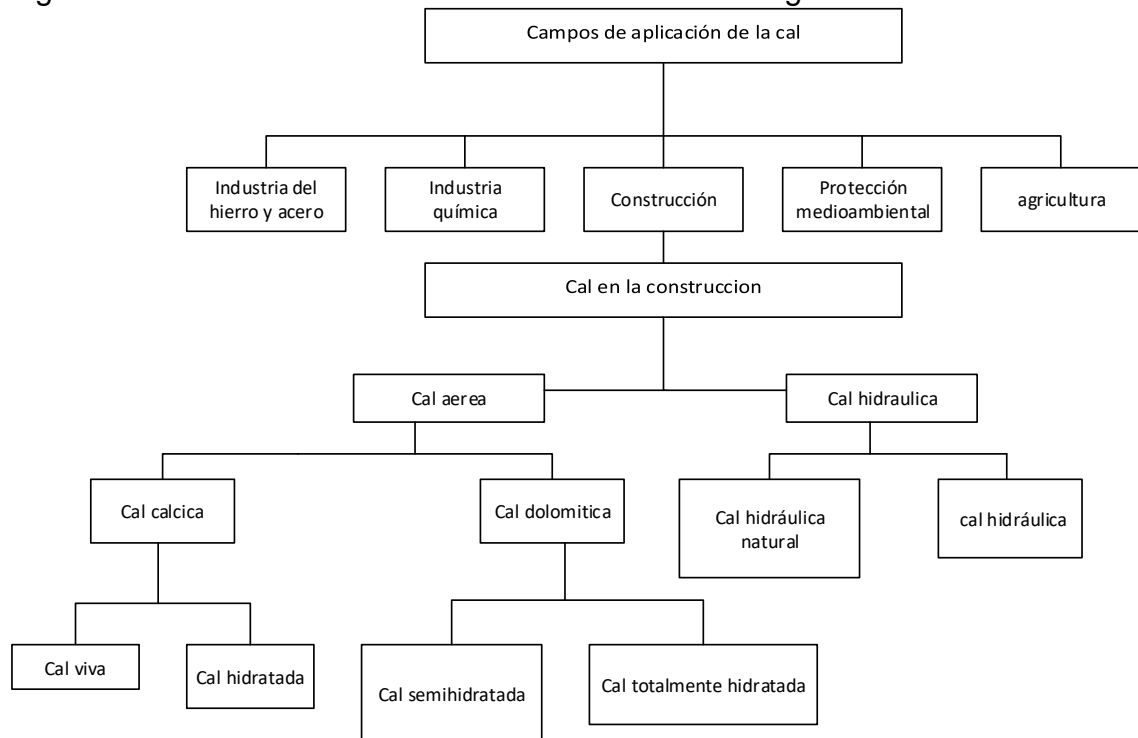
De entre todos los factores a considerar los más relevantes para la eficacia del proceso de modificación y estabilización son:

- a) Composición del suelo
 - Contenido de arcilla y material orgánico
 - Características mineralógicas
- b) Plasticidad del suelo
- c) Presencia de agua
- d) PH

2.5 CAL

La cal es un material que, por su naturaleza puzolánica y su carácter iónico, genera en los suelos cambios tanto físicos como químicos. Modificando y estabilizando sus propiedades, pero estas tienen diferentes presentaciones. “Dentro de las diferentes presentaciones de la cal se destaca la cal cálcica y la cal dolomítica para ser usadas en la estabilización de suelos arcillosos” (AENOR, 2012).

Figura 3. Clasificaciones de la cal en la construcción según UNE EN 459-1 .2001



Fuente: Propia

Como se especifica en la

Figura 3 la cal ha sido usada en diferentes industrias como lo es la metalurgia, la agricultura, la purificación de aguas, en cuanto a la construcción se ha hecho uso de cal hidráulica como material y la cal aérea como estabilizante o modificador del pH de los suelos.

En relación con el tratamiento de suelos es recomendable hacer uso de cal viva (óxido de calcio), cal hidratada (hidróxido de calcio) o una lechada de cal, en efecto de los procesos de secado del suelo, reducción de plasticidad, aumento de su estabilidad y aumento de la capacidad portante; con fin de elegir el producto estabilizante más conveniente se determinaron las ventajas y

desventajas de cada tipo de producto como se muestra en la Tabla 8. (NLA, 2004)

Tabla 8. Comparación de productos estabilizantes con base en cal aérea

PRODUCTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CAL VIVA EN SECO	<ul style="list-style-type: none"> • Menor almacenamiento • Menores dosificaciones • Poco polvo en procesos constructivos • Eficaz para el secado del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de agua para activarse • Almacenamiento adecuado • Gastos de implementos de seguridad
CAL HIDRATADA EN POLVO	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones rápidas • Reducción de costos de mano de obra • Bajo riesgo de manipulación • Se podría usar para el secado del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor volumen almacenamiento, y partículas más finas • Mayores dosificaciones • Levantamiento de polvo
LECHADAS DE CAL	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación libre de polvo • Poca agua para mezcla final 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja velocidad de aplicación • Mano de obra especializada • Equipos extras requeridos • No seca el suelo

Fuente: Propia

Visto que la cal hidratada es el producto de mejores características, puesto que no tiene mayores desventajas y teniendo en cuenta que la cal funciona por su composición química, se requiere identificar las especificaciones para que la cal funcione correctamente a lo cual se encontraron los valores obtenidos en la Tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones de la CAL hidratada,

PROPIEDADES	PARÁMETRO	REQUISITO
Químicas	Oxido total (CaO + MgO), sobre base no volátil, min. (%)	90
	Dióxido de carbono, tomado en la planta de fabricación, máx. (%)	5
	Cal aprovechable según la ASTM C 25, o la AASHTO T 219, min. (%)	90 sobre una base no volátil 70 sobre una base volátil
Físicas	Humedad libre en punto de fabricación, máx. (%)	2
	Distribución de tamaños	Partículas retenidas en el tamiz no 3, 3% máx. Partículas retenidas en el tamiz no 200, 25% máx.

Fuente: INVIAS (ASTM-C977-18, 2018).

Un producto que tenga las especificaciones mencionadas puede cumplir la función de agente estabilizante correctamente, pero, también es necesario que dicho material sea correctamente almacenado, ya que, absorbe la humedad del ambiente y una vez fraguado no puede ser usado.

2.7 ESTABILIZACIÓN SUELOS ARCILLOSOS CON CAL

La estabilización de suelos es el proceso de cambio de las características de resistencia, estabilidad y durabilidad del suelo. La CAL se ha empleado en diferente variedad de suelos por sus propiedades mineralógicas y su consistencia química; generando una reacción con los elementos químicos del suelo la cual permite que dichas propiedades se mejoren (Castelló Bauzá, 2003).

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con CAL se pueden reducir en 3 fases según los efectos que tiene el suelo y dichas fases son:

- **Secado:** Inmediatamente cuando la Cal hidratada se mezcla con el agua presente en las arcillas ocurre una hidratación de esta partícula de Cal secando el terreno.
- **Modificación:** Al momento de la mezcla hay un cambio inmediato en las condiciones de granulometría, capacidad portante y compacidad la cual sucede por:
 - **intercambio de iones entre la arcilla y la cal:** al momento de realizarse la mezcla con el suelo los iones de calcio tienden a reemplazar los iones naturales como los de sodio, magnesio o potasio
 - **aglomeración de las partículas de arcilla:** el intercambio iónico anteriormente mencionado produce una reducción en las capas ya que los iones formados tienen una atracción mayor generando formando flóculos y conjuntos de partícula por lo que se mejora la granulometría del suelo
- **Estabilización:** lo cual se explica por una mejora de las características resistentes del suelo a mediano y largo plazo que se produce por:

- **reacción puzolánica de cementación:** la sílice y la alúmina presente que al momento de mezclarse con cal generan aluminatos y silicatos de calcio hidratados, los cuales son productos parecidos a los que se generan en la producción del cemento portland por lo que dichos compuestos cumplen una función cementante
- **carbonatación:** aunque no está asociado como un efecto final de la mezcla con la arcilla cabe la posibilidad que dicha mezcla revierta los carbonatos de los cuales se forma la cal.

Reacción química de la cal con las arcillas

La mezcla de cal, arcilla y el agua genera una reacción exotérmica, los iones de calcio (Ca^{++}) de la cal se intercambian las partículas de arcilla, con el agua y otros iones. Mediante la reacción exotérmica se evapora el exceso de humedad aumentando la resistencia y reduciendo el índice de plasticidad a niveles moderados, por lo que se aprecia un cambio físico en las arcillas a un carácter más arenoso o granular.

Al elevar el porcentaje usado de cal, el pH del suelo estabilizado toma valores muy alcalinos, también se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que funcionan como aglomerantes aumentando la resistencia. Esta reacción de tipo puzolánica es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. (Alvarez & Echeverri, 1999)

2.8 DOSIFICACIONES DE CAL EN ARCILLAS

Para la selección de la mejor dosificación de cal en el suelo se puede emplear una de las dos metodologías propuestas. La primera es la norma INVIAS 601 que se basa en la ASTM D-6276 la cual es denominada el método de Eades y Grim con base en el pH de la mezcla o por la norma AASHTO T 220 la cual hace la estimación de la proporción de cal según el índice de plasticidad.

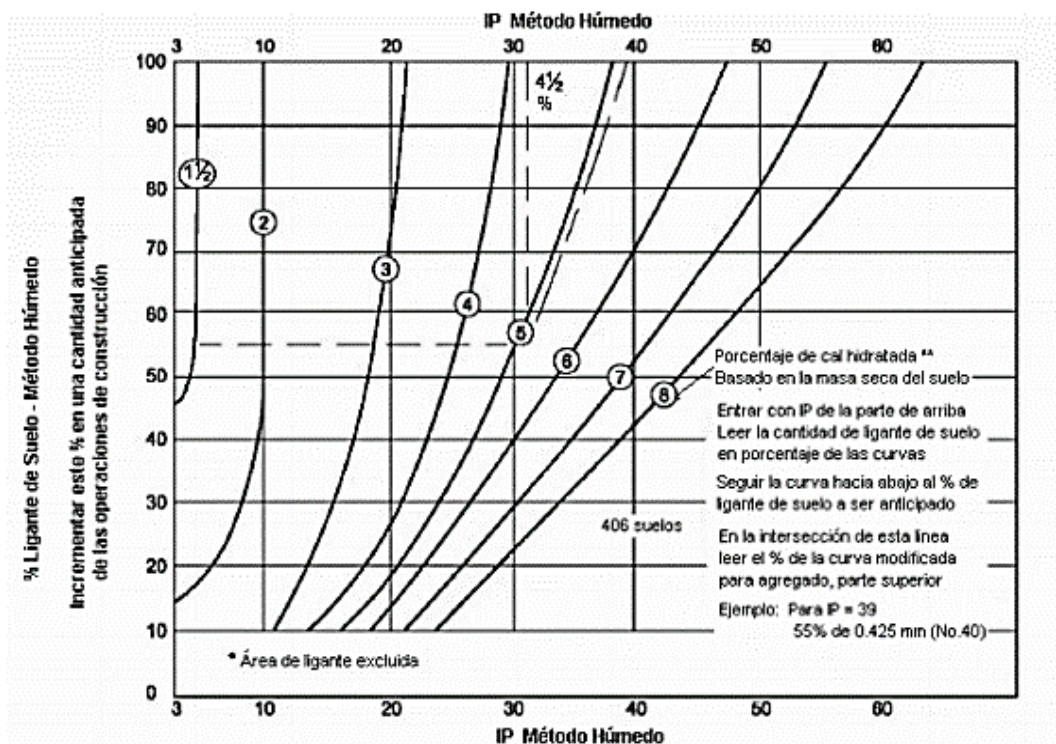
AASHTO T 220: método gráfico AASHTO

Para este método se hace necesario la realización de los siguientes ensayos del suelo a estabilizar para tener los parámetros de entrada a la Figura 4:

- Análisis granulométrico
- Límite líquido
- Límite plástico e índice de plasticidad

Se entra con el índice de plasticidad y el porcentaje que pasa por el tamiz de 425 μm (No.40), determinado en la Sección 4, del suelo no tratado, en la Figura 4 y se determina el porcentaje de cal que se debe agregar al suelo.

Figura 4. Cantidades recomendadas de cal para la estabilización de subrasantes y bases



Fuente: AASHTO T 220

Inv. E 601: método ensayo Eades y Grim

Esta norma permite identificar el porcentaje de cal que se debe utilizar para estabilizar un suelo, en el cual se determina el menor porcentaje de cal el cual da paso a un pH de 12.4 en la mezcla de suelo con cal. (INVIAS, Sección 600 , Especificaciones Generales de Construcción de carreteras y Normas de Ensayo de materiales para carreteras, 2013)

Verificación pH

Luego de los ensayos se válida la dosificación del suelo con cal y el pH en el que se considera que el menor porcentaje de cal a un pH de 12.4, este será el porcentaje más adecuado para realizar una estabilización de suelo. En dado caso que en la mezcla el valor del pH es 12.3 o menor se deben realizar pruebas adicionales en donde el porcentaje de cal aumenta para llegar al pH requerido, si al utilizar las demás pruebas se evidencia que el pH en cada una es menor a 12.3, es decir, el ensayo no cumplió con los requisitos para estabilizar el suelo y esto sucede ya sea por el porcentaje de cal que se utilizó o por errores que tiene el equipo que se usó.

Verificación compresión inconfiada

Generalmente, una resistencia inconfiada de 690 kPa (100 psi) (AASHTO, 1 Enero 1966) es satisfactoria para la capa final en bases y es deseable que los materiales para dichas capas contengan un mínimo, del 50% retenido en el tamiz de 425 μ m (No.40) antes del tratamiento. Diferentes clases de suelo se pueden tratar para subbase, y, en tales casos, la resistencia mínima sugerida para la compresión inconfiada es de 345 kPa (50 psi). (ASTM-D6276-19, 2019).

2.9 TEORÍAS DE CAPACIDAD DE CARGA

Para determinar la capacidad de carga de los suelos y a lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes ecuaciones como Terzaghi, autor que propuso y estimo como es el comportamiento del suelo en función de el desplante, la cohesión, el peso específico del suelo, el Ángulo de fricción, entre otros parámetros de resistencia del suelo. (Patzán, 2009)

Ecuación de capacidad de carga por Terzaghi

se hará uso solo de las cimentaciones cuadradas, en condiciones no drenadas, no consolidadas, la falla será por corte general y se determinan como se muestra en la Ecuación 1. (Braja, 2013)

$$q_u = 1.3 c N_c + q N_q + 0.4 \gamma b N_\gamma \quad \text{Ecuación 1}$$

Ecuación capacidad de carga (Terzaghi) en suelos cohesivos en condición uu

Para el caso de los suelos cohesivos en condición no drenada, no consolidada y para una zapata cuadrada, y teniendo en cuenta que se aplicó la carga en la superficie del suelo se pueden reducir términos de la ecuación simplificando y llegado a una ecuación que sirve netamente para el caso de los suelos cohesivos en condición UU con desplante igual a cero.

Ya que el término q depende del desplante y este se va a asumir como cero el término q se reduce a cero, y como para la condición UU el Ángulo de fricción en suelos cohesivos es cero se pueden asignar valores y tomar como constantes los factores de carga de Vesic ($N_q = 1.0, N_c = 5.7$ y $N_\gamma = 0$); Permitiendo que la ecuación de capacidad de carga se reduzca como se muestra a continuación:

$$q_u = 1.3 C_u (5.7) + \gamma * (0)(1) + 0.4 \gamma b (0) \quad \text{Ecuación 2}$$

Dando lugar a la Ecuación 3, y acotando que esta es en condiciones UU, para zapatas cuadradas con un desplante de cero.

$$q_u = 7.41 * C_u \quad \text{Ecuación 3.}$$

2.10 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos brinda una solución aproximada a las ecuaciones diferenciales en casos de ingeniería geotécnica. Dividiendo la zona de estudio en un número finito de elementos; formando cada elemento un número finito de nodos y estos con diferentes libertades o incógnitas que son los datos a evaluar con dicho modelo; por ejemplo, en el caso de estudio, ya que se evaluaron los desplazamientos en relación a las cargas impuestas hasta el punto de fallo del suelo.

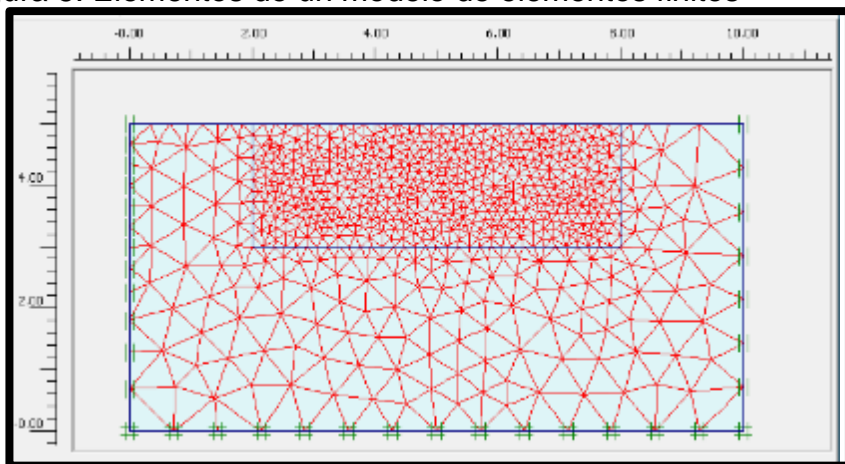
En conclusión, y según diferentes autores “el modelo de elementos finitos se basa en la parametrización de un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, siendo por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos” (Bustamante Herman, 2011); por lo que se requiere un software para implementar elementos finitos, y se empleó el software Plaxis v.8 v estudiantil.

Malla de elementos finitos empleada en el modelo

Al realizar una modelación por el método de elementos finitos hay 3 tipos de componentes (García & Escamilla, 2011), los cuales son los siguientes:

- **Elementos:** al momento de ser generada la malla se divide el área de estudio, los materiales que tengan las mismas propiedades en forma triangular.

Figura 5. Elementos de un modelo de elementos finitos



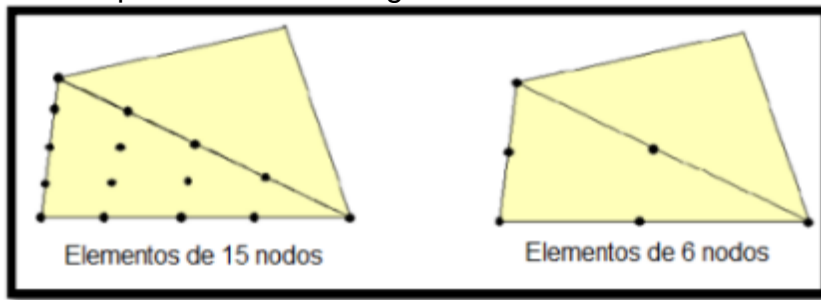
Fuente: Propia

Tipos de elementos finitos

Plaxis ofrece dos tipos de elementos dependiendo de los resultados y los objetivos que se esperen obtener de dicho software los cuales difieren en forma y se tiene que tener en cuenta la capacidad del hardware que esté procesando dicho proceso.

Según la cantidad de nodos que se esperen tener en cuenta en la simulación ofreciendo dos opciones que son modelo de elementos de 15 nodos y modelo de elementos de 6 nodos, en los cuales se dividen en triángulos pero, con la diferencia que el de modelo de 15 nodos estudia puntos dentro de la zona de estudio, mientras el modelo de 6 nodos estudia el perímetro de la zona de estudio como se muestra en la Figura 6.

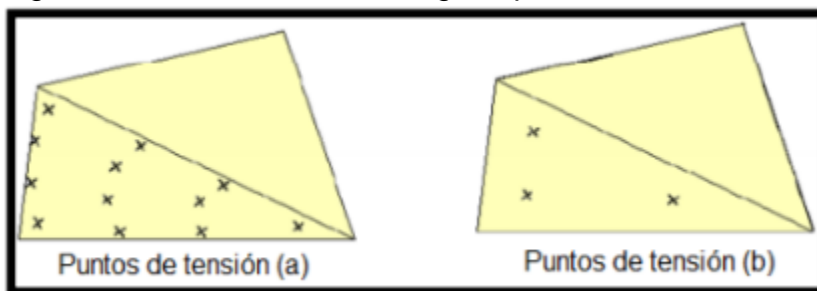
Figura 6. Tipos de modelos según los elementos



Fuente: Plaxis 2D manual

a su vez cada elemento triangular de 15 nodos tiene 12 puntos de tensión, mientras que el elemento triangular de 6 nodos tiene 3 puntos de tensión; puntos que pueden ser preseleccionados para verificar los diagramas de esfuerzo deformación

Figura 7. Puntos de tensión según tipos de modelos



fuentes: Plaxis 2D manual

- **Nodos:** son los puntos de intersección entre los elementos siendo la unión en entre dichos triángulos; puntos comunes en los cuales se van a calcular los desplazamientos
- **Puntos de tensión:** cada elemento triangular de 15 nodos tiene 12 puntos de tensión, mientras que el elemento triangular de 6 nodos tiene 3 puntos de tensión; puntos que pueden ser preseleccionados para verificar los diagramas de esfuerzo deformación

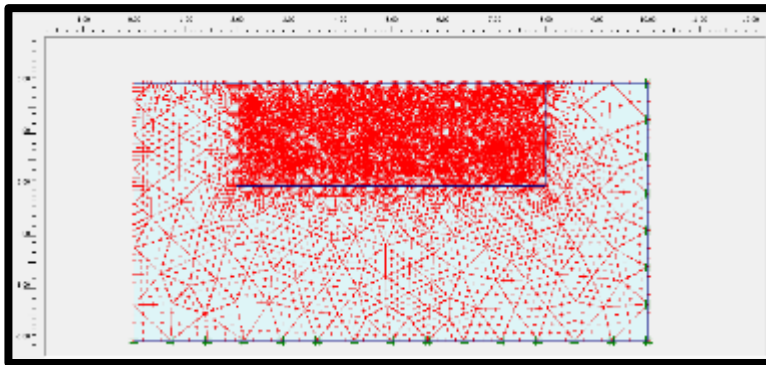


Figura 8. Puntos de tensión en modelo de elementos finitos
Fuente: Propia

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 CARACTERIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO TRATADO CON HIDRÓXIDO DE CALCIO

Tabla 10. Ficha técnica “estudio caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio”

INTRODUCCIÓN	El hidróxido de calcio sirve como estabilizante en la manera que se utiliza para tratar suelos susceptibles como un suelo arcilloso y aparte lo que se busca es que por medio de ensayos determinar las características físicas mecánicas y químicas, y que aparte de esto realizará una mejor trabajabilidad en el suelo que se estudia. (Higuera Sandoval, Gomez Cristancho, & Pardo Naranjo, 2012)	
DESARROLLO	PROBLEMÁTICA	Los suelos expansivos son aquellos que muestran un cambio volumétrico significativo bajo la presencia de agua. Así, ciertas arcillas, en cuya composición entra a formar parte la mineral montmorillonita, tienen espacios entre las láminas que pueden absorber agua provocando su expansión. Estos materiales se conocen como arcillas expansivas o suelos expansivos, y son la causa de la mayoría de los problemas derivados de la construcción de carreteras o edificios en suelos que tengan esta capacidad.
	METODOLOGÍA	Se caracterizo un suelo arcilloso y las mezclas de suelo e hidróxido de calcio, conociendo principalmente la obtención del suelo y del hidróxido de calcio, después se procede a realizar la caracterización de suelo y del hidróxido de calcio mediante ensayos químicos, físicos y mecánicos, al realizar los respectivos ensayos y al tener la mezcla, se verifica la caracterización del suelo tratado con diferentes porcentajes de hidróxido de calcio y se procede a realizar ensayos químicos, físicos y mecánicos
	RESULTADOS	el suelo generó una capacidad cementante en el material resultante este proyecto demostró que el hidróxido de calcio sea muy útil en la estabilización de suelos arcillosos ya que genera cambios significativos en sus propiedades físico-mecánicas y químicas del suelo y en el cual genera que sean óptimas para la utilización en las estructuras de pavimentos.
CONCLUSIONES	De este trabajo se puede concluir que el hidróxido de calcio modificó las características físicas del suelo original, eso generó que el límite plástico aumenta y el límite líquido disminuyera, a su vez el índice de plasticidad disminuye, aparte el hidróxido de calcio al mezclarse con	
BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> • S. Rodríguez. Manual. ANCADE. Tratamientos de suelos con cal. Planteamiento general, diseño y control de calidad. Madrid. 2005. • C. H. Higuera Sandoval. Estabilización de Suelos. Guías de clase, Universidad del Cauca, Popayán, 2010. 	

Fuente: Propia

3.2. ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO CON CAL Y CENIZA VOLANTE

Tabla 11. Ficha técnica “estudio estabilización de un suelo con cal y ceniza volante “

INTRODUCCIÓN	Para la estabilización de los suelos, la cal ha sido un componente muy útil, debido a que se ha utilizado a través de los años en construcciones que han marcado la historia, ya que este material genera mayor estabilidad, durabilidad, plasticidad y resistencia en la estructura, lo que hace posible utilizarla no solo por su duración, sino que también porque de muy bajo costo y no realizara daños en el medio ambiente.	
DESARROLLO	PROBLEMÁTICA	La idea surge debido a que en muchos casos cuando se realiza ciertas construcciones, las propiedades que se encuentran en el suelo en ese instante, pueden ocasionar fallas estructurales lo que impide un buen funcionamiento de este, por esa razón, la cal genera mayor seguridad y mejor costo económico en el momento de realizar la obra.
	METODOLOGÍA	Se realizó la caracterización del caolín, con base en los ensayos que se rigen a partir de la Norma Invias, en el cual se indica la realización de la gravedad específica, para así mismo después de realizar los procedimientos, se continúe realizando más ensayos, debido a que se utilizan 3(tres) materiales, a cada uno se le realizan dosificaciones para agregarlas en el suelo, así mismo se le agrega una humedad óptima a la muestra para su respectiva compactación, al tener las muestras se procede a fallar a tracción y compresión cada muestra.
	RESULTADOS	La cal como arrojan los resultados genera mayor seguridad en las construcciones, debido a la facilidad que tiene al absorber la humedad, así mismo genera una mayor resistencia en el suelo, adicionalmente la cal no tiende a deformarse fácilmente como otros materiales ya que tiene un comportamiento más dúctil.
CONCLUSIONES	Se puede concluir mediante este proyecto que la cal genera mayor seguridad debido a que al realizar los ensayos de compresión y tracción, los resultados fueron muy favorables lo que significa que, al realizar una mejora en la carretera, generará mayor resistencia y aparte que el costo de modificación tendrá un costo económico muy bajo.	
BIBLIOGRAFÍA	<ul style="list-style-type: none"> • FONTALVO, OSCAR; MEDRANO, BRUNO; NADAD, FABIAN. Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base. Trabajo de investigación en campo. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2006. • MURRAY, ANN. La diferencia entre la cal hidratada y la cal viva. [en línea] [fecha de consulta 23 de febrero de 2018]. M. R. HALL, K. B. NAJIM, P. KEIKHAEI DEHDEZI. Soil Stabilization and earth construction: materials, properties and techniques. [en línea] [fecha de consulta 18 de marzo de 2018]. University of Nottingham. United Kingdom. 2014 	

Fuente: Propia

3.3 A NUMERICAL AND ANALYTICAL STUDY ON THE BEARING CAPACITY OF TWO NEIGHBORING SHALLOW STRIP FOUNDATIONS ON SAND

Tabla 12. Ficha técnica "A Numerical and Analytical Study on the Bearing Capacity of Two Neighboring Shallow Strip Foundations on Sand"

INTRODUCCIÓN	La capacidad de carga puede interpretarse ya sea por métodos experimentales, analíticos o numéricos, muchas veces el tipo de zapata afecta significativamente los cimientos, debido a que, si están en contacto unos con otros, pueden generar interferencias y afectar la capacidad de carga y los asentamientos del suelo y adicionalmente si las zapatas tienen un espaciado, pueden causar un efecto en el rodamiento en la capacidad de zapatas.	
DESARROLLO	PROBLEMÁTICA	La interferencia entre las cimentaciones es el mayor problema que se presenta en las zapatas con poco espaciamiento, debido a que se debe estimar la capacidad de carga que se encuentran en 2 zapatas en función de solo una, lo que se busca es tener una solución analítica para el rodamiento de dos zapatas, y de enfocarse en el comportamiento de los asentamientos.
	METODOLOGÍA	Se realiza procedimiento para poder realizar el cálculo de la capacidad de carga de dos zapatas, en el cual se debe tener en cuenta sus dimensiones, adicionalmente el espaciado que hay entre las zapatas, el suelo es válido para saber que propiedades tiene y cómo mejorarlas.
	RESULTADOS	para que el suelo tenga mejores propiedades, la capacidad de carga para las dos zapatas, las cuales presentaban interferencia, se llegó a una solución la cual fue por el método de equilibrio límite, el cual supuso un modelo rígido y por consiguiente aumenta el tamaño de la región resistente.
CONCLUSIONES	Se puede concluir mediante el proceso realizado que el factor de eficiencia aumenta a medida que la distancia que separa las zapatas va disminuyendo constantemente,	
BIBLIOGRAFÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Stuart JG (1962) Interference between foundations, with special reference to surface footings in sand. Geotechnique 12(1):15–22 • Kumar J, Bhoi MK (2009) Interference of two closely spaced strip footings on sand using model tests. J Geotech Geoenviron Eng 134(4):595–604 • Ghosh P, Basudhar PK, Srinivasan V, Kunal K (2015) Experimental studies on interference of two angular footings resting on the surface of two-layer cohesionless soil deposit. Int J Geotech Eng 9(4):422–433 	

Fuente: Propia

3.4. EFFECTS OF LIME ADDITION ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SEDIMENTARY SOIL IN CURITIBA

Tabla 13. Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in curitiba

INTRODUCCIÓN	El suelo presente en la formación geológica de Guabirota (Cuenca del Paraná, Brasil) tiene propiedades físico-mecánicas deficientes para su utilización en la construcción de pavimentos, en la protección de laderas y pendientes o como soporte de cimientos poco profundos. Por lo que hay que estudiar el efecto del tratamiento de este suelo mediante la adición de cal para mejorar su trabajabilidad. (Jair A. Baldovino & Eclesielter B. Moreira, 2018)	
DESARROLLO	PROBLEMÁTICA	La estabilización de suelos arcillosos mediante diferentes aditivos puede ser considerado como uno de estos métodos, porque la sustitución de suelos inapropiados por los adecuados se ha convertido cada vez más caro y ecológicamente inseguro. Además, estabilización por cemento no es preferible debido a su costo creciente y las preocupaciones ambientales relacionadas con su producción
	METODOLOGÍA	Los investigadores han intentado comprender la influencia de diferentes cantidades de cal sobre los comportamientos mecánicos de estos tipos de suelos. Sobre el comportamiento de algunos suelos reportados en la literatura. Generalmente, la cantidad de cal utilizada para mejorar los suelos está entre el 3% y el 9%, y el tiempo de curado utilizado varía de 7 d a 360 d. El usando Ensayos para estudiar el comportamiento mecánico de suelos mejorados con cal. incluyendo resistencia a la compresión no confinada, CBR, corte directo y triaxial.
	RESULTADOS	Los resultados muestran que la resistencia a la compresión no confinada (UCS) aumentó linealmente con la cantidad de cal para las mezclas suelo-cenizas volantes-cal. Una función de potencia se adapta mejor a la relación UCS-porosidad (η) para mezclas suelo-cenizas volantes-cal.
CONCLUSIONES	El objetivo del presente estudio fue medir la influencia de adición de cal hidratada en compresión y división no confinada resistencias a tracción de un suelo sedimentario de la formación geológica Guabirota (Curitiba, Brasil). Ambos valores de q_u y q_t aumentan a medida que aumenta el tiempo de curado. Para un tiempo de curado de 90 d, el máximo q_u y se obtuvieron valores de q_t . En el tiempo de curado de 90 d, los no confinados resistencia a la compresión q_u aumenta en un 400% para un contenido de cal del 9%, 260% para 7% de cal, 240% para 5% de cal y 170% para 3% de cal	
BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> J.A. Baldovino et al. / Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 10 (2018) 188e194 193 Consoli NC, Cruz RC, Floss MF, Festugato L. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2010;136(5):759e63. Consoli NC, Dolla Rosa A, Gauer EA, dos Santos VR, Moretto RL, Corte MB. Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures. Geotechnique Letters 2012;2(3):81e5. 	

Fuente: Propia

3.5. VARIABLES GOVERNING STRENGTH OF COMPACTED SOIL-FLY ASH-LIME MIXTURES

Tabla 14. Ficha técnica de variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures

INTRODUCCIÓN	Con base en la práctica de tratar el suelo con un factor cementante siendo una técnica necesaria cuando el proyecto requiere la mejora del suelo de fundación. Siendo usada para la construcción de bases estabilizadas, para cimentaciones poco profundas y para fortalecer taludes en estabilidad de taludes (Consoli N & Saldanha R,2011)	
DESARROLLO	PROBLEMÁTICA	Este análisis estudia la variación de la cantidad de restos volantes, la cantidad de cal y la porosidad en la fuerza de un amasijo de tierra gredoso-restos volantes-cal, evaluando el uso de una afinidad de vacío-cal ($\eta = Lv$) para valorar su resistencia a la compresión no confinada (UCS). Centrándose en los tiempos de curado (90 días de curado) de la relación de cal en la resistencia a la compresión inconfiada de las mezclas suelo-cal y volantes.
	METODOLOGÍA	En este estudio se evalúan los parámetros de resistencia de un suelo arenoso tratado con cenizas volantes y cal en el cual la relación de vacíos ($\eta = Lv$) juega un papel fundamental en la evaluación del objetivo. Haciendo variaciones en la cantidad de cenizas volantes, la cantidad de cal, la porosidad y la relación huecos-cal. En el presente trabajo se realizaron ensayos de compresión no confinada y medidas de succión.
	RESULTADOS	Los resultados muestran que la resistencia a la compresión no confinada (UCS) aumentó linealmente con la cantidad de cal para las mezclas suelo-cenizas volantes-cal. Una función de potencia se adapta mejor a la relación UCS-porosidad (η) para mezclas suelo-cenizas volantes-cal. La razón $\eta = Lv$, en la que Lv se ajusta por un exponente (en este caso 0,12 para todo el suelo- mezclas de cenizas volantes-cal estudiadas), se muestra como un buen parámetro en la evaluación de la UCS del suelo estudiado (UCS varía de forma no lineal con $\eta = Lv$ en el caso de la adición de cenizas volantes-cal).
CONCLUSIONES	Finalmente, se encontró que una correlación única controla la fuerza del suelo compactado-mosca mezclas de ceniza-cal estudiadas; en consecuencia, utilizando esta relación un ingeniero (considerando las particularidades de cada caso como precio, disponibilidad, y costo de transporte de cada material, entre otros) se puede elegir la cantidad de cal, la cantidad de cenizas volantes y el esfuerzo de compactación apropiado para proporcionar una mezcla que cumpla con la resistencia requerida por un proyecto al costo óptimo.	
BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> • Kumar, A., Walia, B. S., and Bajaj, A. (2007). "Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soils." J. Mater. Civ. Eng., 19(3), 242-248. • Ladd, R. S. (1978). "Preparing test specimens using under-compaction." Geotech. Test. J., 1(1), 16-23. 	

Fuente: Propia

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la variación de la capacidad de carga para cimentaciones superficiales de un suelo arcilloso de la sabana de Bogotá, como función del contenido de cal hidratada, a partir de análisis semi - empíricos y de elementos finitos

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar revisión literaria para la obtención de parámetros de resistencia para suelos de la sabana de Bogotá
- Estudiar la variación de parámetros de resistencia y de deformabilidad en arcillas de alta compresibilidad bajo condición UU como efecto de estabilización química con cal
- Efectuar análisis de capacidad de carga y análisis comparativos, evaluando el aporte dado por la estabilización, por métodos semi-empíricos y de elementos finitos

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1 ALCANCES

Se determinó la variación de las propiedades físicas y mecánicas de un suelo arcilloso de alta compresibilidad en función de cal hidratada, estudiando la capacidad de carga. Comparando los resultados obtenidos por métodos semi - empíricos y modelos de elementos finitos.

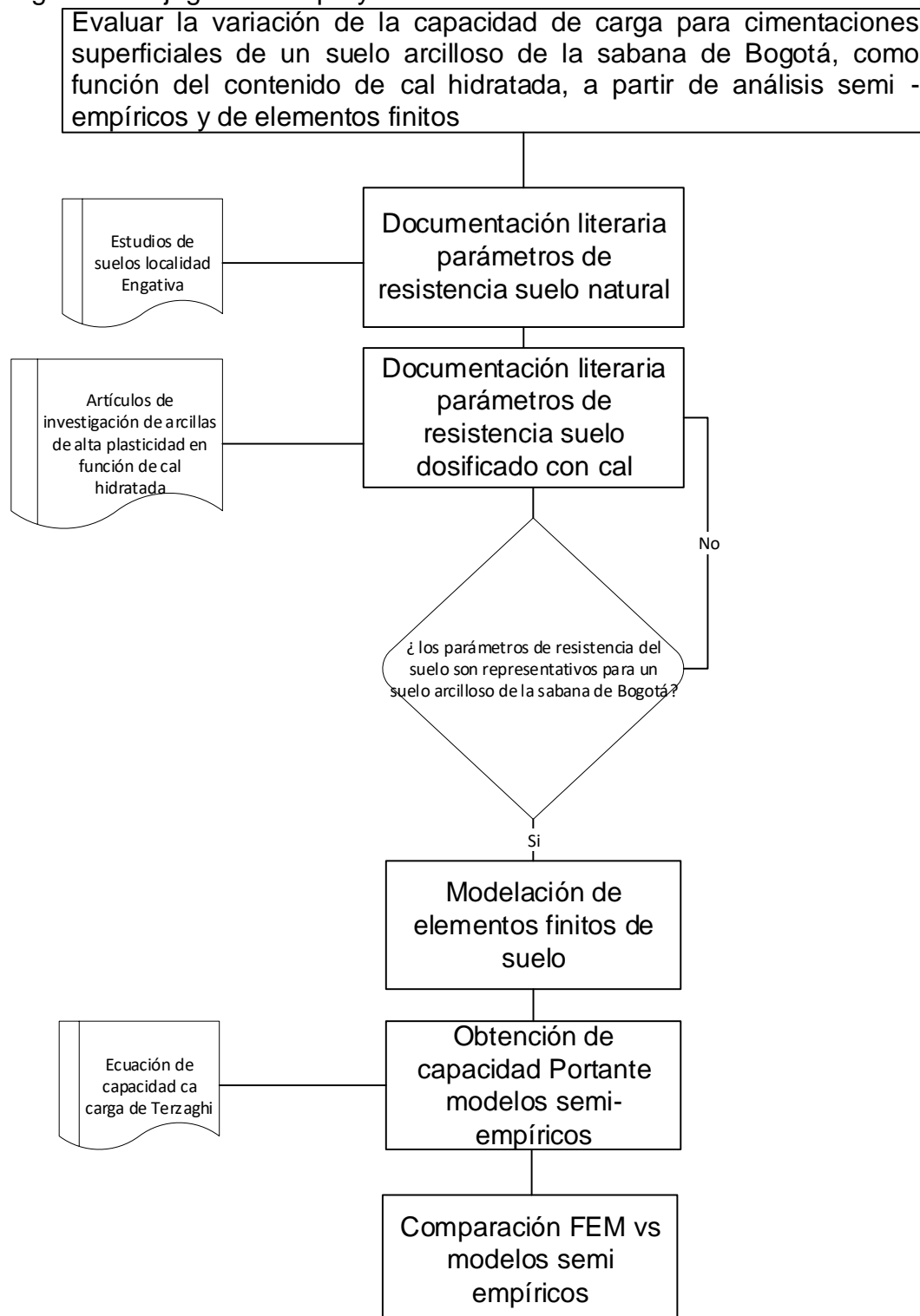
5.2 LIMITACIONES

- No se evaluaron los asentamientos en el suelo de estudio.
- Se hizo el estudio de un suelo cohesivo, en condiciones no drenadas y no consolidadas.
- Se consultaron estudios de estabilización con cal hidratada como agente estabilizante.
- Los parámetros entregados a Plaxis son valores referenciales puesto que pueden estar sujetos a un grado de dispersión debido a la naturaleza heterogénea del suelo.
- Los parámetros de variación de propiedades en función de la cal hidratada se verán sujetos al estado del arte.
- Se hizo el estudio de capacidad de carga para cimentaciones superficiales.
- Teniendo en cuenta la gran variedad de autores que presentan ecuaciones de capacidad de carga se hizo uso de Terzaghi
- Se hizo el estudio para zapatas rígidas
- Los suelos serán simulados bajo el modelo de Mohr-coulomb
- Se estimaron valores de resistencia no drenada al corte y módulo de elasticidad con base en un tiempo de curado de 7 días.
- Es necesario realizar más dosificaciones de cal para definir la curva y el porcentaje óptimo de cal

6. METODOLOGÍA

Para la ejecución de este proyecto se trabajó bajo el flujograma mostrado en la Figura 9.

Figura 9. Flujograma del proyecto



Fuente: Propia

Para la correcta ejecución, y la obtención de unos resultados adecuados con las temáticas propuestas es necesario realizar las seis fases explicadas en la Tabla 15 Y representadas en la Figura 9. Para poder cumplir con los objetivos tanto general como específicos que se plantearon en este trabajo.

Tabla 15. Metodología del proyecto

FASE	OBJETIVO
1.Documentación literaria parámetros de resistencia suelo natural	Con el fin de representar los parámetros de un suelo arcilloso de alta plasticidad se verificará la literatura intentando obtener parámetros pertinentes y representativos de este tipo de suelo.
2. Documentación literaria parámetros de resistencia suelo dosificado con cal	Se determinarán los parámetros de resistencia para los suelos con diferentes dosificaciones de cal, se verificará la literatura intentando obtener parámetros pertinentes y representativos de estos tipos de suelos.
3. Modelación de elementos finitos de suelo	Se realizará la modelación de los suelos propuestos en el trabajo con fin de obtener el comportamiento mecánico de los parámetros de resistencia obtenidos en la fase 2 en un suelo arcilloso de alta plasticidad en función de un porcentaje de cal hidratada.
4. Obtención de capacidad Terzaghi	Calcular la capacidad portante teórica, tomando como base los parámetros de resistencia que se obtuvieron en la fase 2 en un suelo arcilloso de alta plasticidad en función de un porcentaje de cal hidratada. Con base en las teorías de capacidad de carga de Terzaghi.
5. Comparación FEM VS modelos semi empíricos	Comprobación y verificación de los valores obtenidos de capacidad portante de fase 4 y fase 3.

Fuente: Propia

6.1. DOCUMENTACIÓN LITERARIA PARÁMETROS DE RESISTENCIA SUELO NATURAL

Para la obtención de los parámetros de resistencia del suelo natural se realizó la investigación de estudios de suelos, ubicados en la localidad de Engativá, enfocándose en una zona geotécnica lacustre A y una zona de respuesta sísmica lacustre 500; obteniendo parámetros de resistencia no drenada al corte, pesos específicos y módulos de elasticidad representativos para los suelos arcillosos de la sabana de Bogotá.

Para obtener dichos resultados se catalogaron todos los ensayos de arcillas de alta plasticidad, luego se realizaron promedios de los resultados obtenidos en los laboratorios de los estudios de suelos, así mismo se llegaron a datos representativos de los suelos arcillosos de la sabana de Bogotá.

6.2. DOCUMENTACIÓN LITERARIA PARÁMETROS DE RESISTENCIA SUELO DOSIFICADO CON CAL

Se determinaron los parámetros de diseño para los suelos con diferentes dosificaciones de cal con las cuales se realizarán los modelos de elementos finitos para una zapata cuadrada en condiciones no drenadas no consolidadas para el suelo definido en los estudios de suelos.

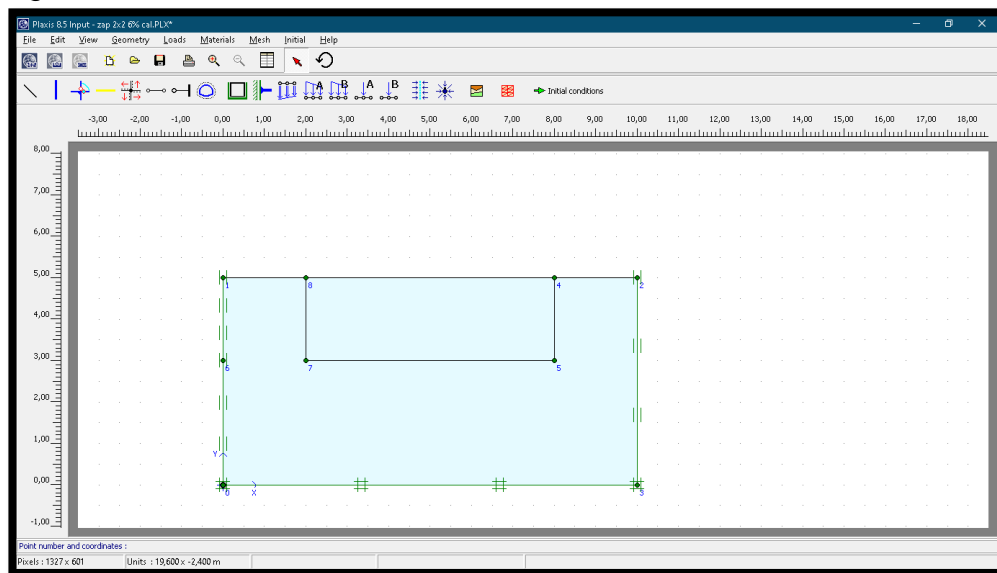
dichos parámetros se determinaron bajo las tendencias del comportamiento de estos en función de cal hidratada, así mismo se eligieron los artículos que guarden una relación tanto mecánica como, física de los suelos bogotanos; con fin de que dichos datos sean representativos.

6.3. MODELACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS DE SUELO

Se define el modelo geotécnico bajo el cual se hicieron las simulaciones, entendiendo que se hizo uso de elementos de 15 nodos bajo las teorías de Mohr-coulomb. Se asumió cinco veces el largo de la zapata para la profundidad y diez veces el largo para el ancho, así mismo se divide en dos secciones dicha área para poder hacer un estudio más preciso de las deformaciones en el centro donde se va a apoyar la zapata (García & Escamilla, 2011).

hay que tener en cuenta que hay que asignar los límites de frontera de tal manera que en las fronteras laterales se permiten desplazamientos en el eje y y en el fondo no se permite ningún tipo de desplazamientos para poder recrear un suelo el cual tenga roca debajo de este mismo y sea continuo, demarcándose en el modelo con las franjas horizontales en los límites verticales y franjas horizontales y verticales en el borde inferior como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Determinación de límites de frontera

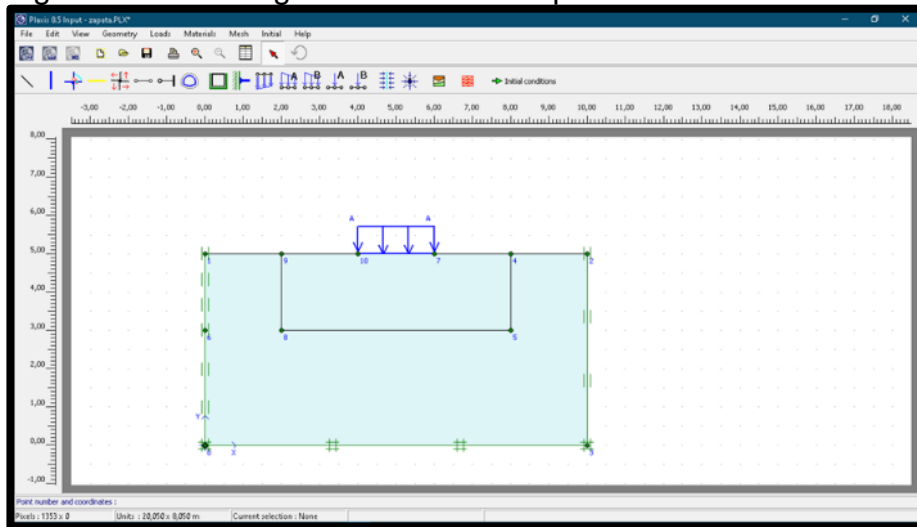


Fuente: Propia

posteriormente como se puede observar en la

Figura 11, de la interfaz de Plaxis, acotando que la zapata rígida se asumirá como una carga distribuida y esta será superficial sin desplante.

Figura 11. Modelo geométrico de la zapata en Plaxis



Fuente: Propia

Después de tener dicho esquema se procede a realizar la caracterización de las propiedades del suelo en las cuales, y como datos relevantes se tienen que considerar el módulo de elasticidad, el peso específico, la resistencia no drenada al corte, Ángulo de fricción, y el coeficiente de poisson.

Insertando como primera medida los pesos específicos tanto secos como saturados al momento de desplegarse la ventana mostrada en la Figura 12 y estableciendo que al ser arcillas son suelos impermeables por lo que son “unDrained” y que se verán evaluados bajo el modelo de Mohr-coulomb.

Figura 12. Tabla de propiedades de suelo general

Fuente: Propia

Luego se establecen los valores teniendo en cuenta que para suelos no drenados el coeficiente de poisson no puede ser mayor a 0,35 y que al ser una arcilla en condiciones no drenadas no consolidadas el ángulo de fricción será igual a cero.

Figura 13. Ventana de ingreso de propiedades de suelo específico

Fuente: Propia

Luego de definir las propiedades del suelo se asignan las propiedades a la sección donde se asignó el área de estudio, como se puede ver en la Figura 13 Plaxis ofrece la opción de tener más de 1 tipo de suelo por lo que en este software se pueden establecer diferentes estratos con diferentes suelos a diferentes espesores con el fin de tener una aproximación acertada a las condiciones de la vida real.

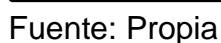
Figura 14. Lista de materiales en simulación 1

Fuente: Propia

Figura 15. Suelo asignado y cargas activadas en el modelo



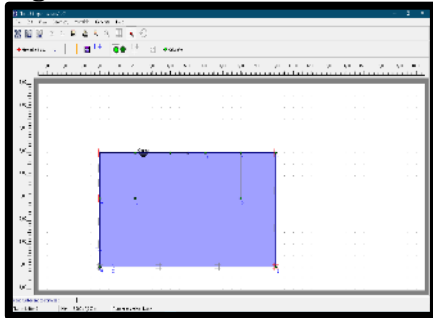
Figura 16. Generación de la malla



42

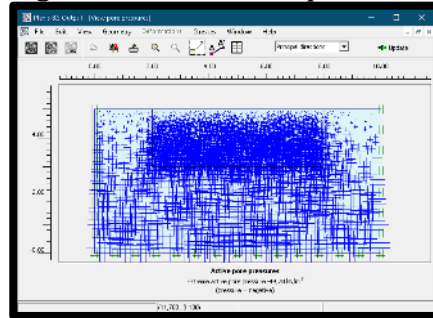
Para dicho proceso se desplegaron las ventanas mostradas en la Figura 17. nivel freático, Figura 18. presión de poros, Figura 19. esfuerzos efectivos y en la Figura 20. Puntos de referencia.

Figura 17. Nivel freático



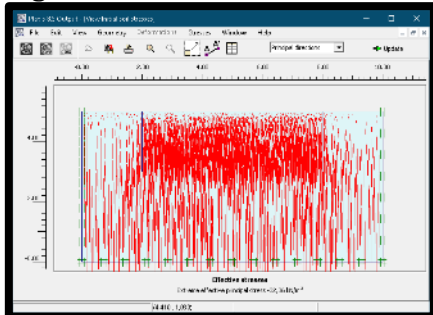
Fuente: Propia

Figura 18. Presión de poros



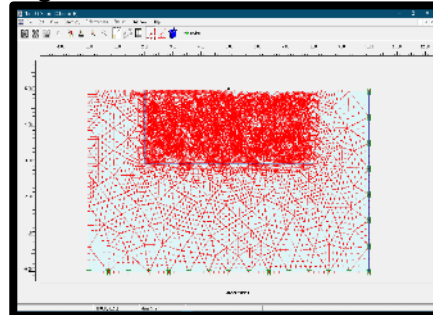
Fuente: Propia

Figura 19. Esfuerzos efectivos



Fuente: Propia

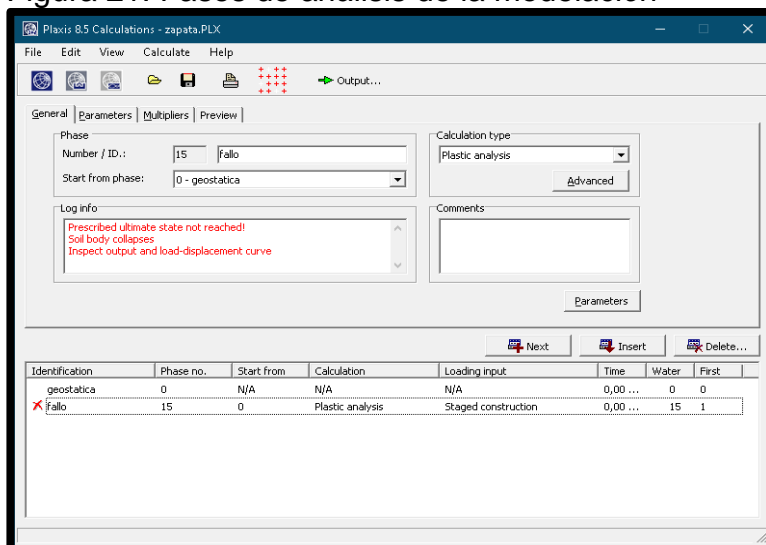
Figura 20. Puntos de referencia



Fuente: Propia

Se asigna una fase de análisis plástico en la cual el Plaxis calcula un asentamiento, y si este es mayor a un umbral definido, el programa asume que se falló el suelo y terminara las iteraciones.

Figura 21. Fases de análisis de la modelación



Fuente: Propia

6.4. OBTENCIÓN DE CAPACIDAD TERZAGHI

Se calculó la capacidad portante teórica, tomando como base los parámetros de resistencia que se obtuvieron en la fase 2 en un suelo arcilloso de alta plasticidad en función de un porcentaje de cal hidratada. Con base en las teorías de capacidad de carga de Terzaghi.

Se calculó la capacidad portante con la ecuación 3 demarcada en el título 2.9 TEORÍAS DE CAPACIDAD DE CARGA, ecuación que se acota en las condiciones no drenadas, no consolidadas, para una zapata cuadrada, sin desplante y denotando que fue deducida de la capacidad de carga de Terzaghi.

6.5. COMPARACIÓN FEM VS MODELOS SEMI EMPÍRICOS

Finalmente se realizó la comparación entre el modelo de elementos finitos y los modelos semi empíricos, identificando las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos. Así reportando los resultados de capacidad portante de cada uno de los métodos y evaluando cómo varía la arcilla con respecto a la cal hidratada por cada una de las metodologías.

Para realizar dichas comparaciones se realizaron diferentes tipos de gráficas, como primera medida gráficas de esfuerzo deformación para el suelo sin tratar y cada una de las dosificaciones, posteriormente se realizaron diagramas de barras reportando las capacidades de carga cada una de estas gráficas reportando tanto el modelo de elementos finitos como el modelo de Terzaghi.

Con fin de determinar con mayor firmeza las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos

7. RESULTADOS

7.1 DOCUMENTACIÓN LITERARIA ESTUDIOS DE SUELOS

Se realizó la recopilación de diferentes estudios de suelos en la sabana de Bogotá, por medio del SGC el cual tiene en su base de documentos diferentes estudios de suelos, dentro de los cuales se seleccionaron estudios de las firmas y los ingenieros Pablo Sáenz y cia. Ltda, Fernando Vázquez y Emiliano Cruz; reportándose tres estudios de suelos de zonas de respuesta sísmica lacustres 500 y zonas lacustres 200, además en zonas de caracterización geotécnica todas entraron en lacustre A, encontrando los siguientes estudios.

7.1.1 ESTUDIO DE SUELOS 1

Descripción

Estudio de suelo de dos lotes rodeados por edificios de tres y cuatro niveles y cercado con un vallado con un metro de profundidad promedio este fue realizado en el barrio de álamos norte, para la construcción de un conjunto de cinco bloques de cinco niveles, distribuidos dos bloques en el lote ubicado en la carrera 105 A no 71 c -70 y tres bloques en el lote ubicado en carrera 105 A no 71-20 a en mampostería confinada, entrepisos macizos y una cubierta liviana de asbesto cemento estimando cargas variables a nivel de la cimentación entre 4.5 Ton /m y 11,5 ton /m .

Tabla 16. Descripción estudio de suelos 1

estudio de suelos 1	
Localización	carrera 105 A - CALLE 71 C -71
Microzonificación	
respuesta sísmica	lacustre 500
zonas geotécnicas	lacustre A
Sondeos	
Cantidad	8
Profundidad	10 m
Ensayos	
humedad natural, Límites, peso unitario. penetrómetro manual, compresión inconfiada	

Fuente: Propia

Exploración

En este estudio se realizaron ocho sondeos de diez metros de profundidad cuatro de ellos en cada lote, realizando la perforación por SPT, midiendo la resistencia al corte con un penetrómetro manual de tipo SOILTEST CL-700, del cual se obtuvieron muestras y se realizaron los ensayos mostrados en la Tabla 16. Descripción estudio de suelos 1

Perfil Estratigráfico

A partir de los registros de campo e interpretación de los resultados de laboratorio se tipificó la estratigrafía representada en la Tabla 17.

Tabla 17. Perfil estratigráfico estudio de suelos 1

Estrato	Profundidad (m)	Descripción
1	0.00 - 0.60	Capa vegetal
2	0.60 - 1.30	Limo arcilloso habano oxidado, $q_u = 3.3 - 1.0 \text{ kg/cm}^2$
3	1.30 - 1.60	Limo arcilloso carmelito $q_u = 1.25 - 0.4 \text{ kg/cm}^2$
4	1.60 - 2.30	Arcilla habana con oxido $q_u = 1.75 - 0.6 \text{ kg/cm}^2$
5	2.30 - 3.00	Arcilla gris con óxido $q_u = 0.75 - 0.25 \text{ kg/cm}^2$
6	3.00 - 5.00	Arcilla limosa gris $q_u = 0.25 \text{ kg/cm}^2$
7	5.00 - 10.50	Arcilla limosa habana oscura $q_u = 0.25 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: Propia

Nivel freático

El nivel freático se documentó en los 8 sondeos y se reportó como se muestra en la Tabla 18 y de la cual se puede inferir que el nivel freático promedio es de 2,2 m adicionando, que este puede verse alterado por el lavado del equipo empleado en la perforación.

Tabla 18. Nivel freático estudio de suelos 1

nivel freático	
Sondeo	profundidad (m)
1	2,5
2	2
3	2,2
4	2,2
5	1,7
6	2,3
7	2,2
8	2,5

Fuente: Propia

Ensayos de laboratorio

Se seleccionaron muestras representativas de cada sondeo a la cual se realizaron pruebas de humedad, límites, compresión inconfiada y pesos específicos de la cual y en relación a los otros estudios ofrece una mayor profundidad de lo cual podemos ver que son arcillas blandas y tiene una plasticidad alta y se muestran los resultados de dichos ensayos en ANEXO 3.

Resultados

Para la edificación de este proyecto se hizo una losa corrida en concreto a una profundidad de más o menos 60 cm en un manto de limo oxidado, con una fatiga de diseño de 4,5 Ton /m².

7.1.2 ESTUDIO DE SUELOS 2

Descripción

Edificación construida en el barrio Normandía, que planea la construcción de un edificio de cuatro pisos, en una estructura de concreto reforzado y modulado con luces de 3,5 a 6 metros con un máximo de cargas de 80 toneladas para la columna más cargada.

Tabla 19. Información estudio de suelos 2

estudio de suelos 2	
Localización	carrera 75 - CLL 51 A
Microzonificación	
respuesta sísmica	lacustre 200
zonas geotécnicas	lacustre A
Sondeos	
Cantidad	2
Profundidad	5 m
Ensayos	
humedad natural, Límites Atterberg, peso unitario, veleta de corte, compresión inconfiada	

Fuente: Propia

Exploración

Para la exploración del subsuelo se realizaron dos perforaciones de cinco metros bajo el nivel de la superficie, con un barreno manual de cuatro pulgadas tomando

muestras de cada una de las perforaciones; también se hicieron ensayos de veleta de corte in situ para complementar.

Perfil estratigráfico

A partir de los registros de campo e interpretación de los resultados de laboratorio se tipificó la estratigrafía representada en la Tabla 20.

Tabla 20. Perfil estratigráfico estudio de suelos 2

Estrato	Profundidad (m)	Descripción
1	0.00 - 0.40	Capa vegetal
2	0.40 - 1.50	Limo orgánico negro con escombros de construcción,
3	1.50 - 2.50	Arcilla limosa habana carmelita con diatomita
4	2.50 - 5.00	Arcila habana grisácea

Fuente: Propia

Nivel freático

en el momento de efectuar los sondeos se determinó que hay un nivel freático a una profundidad de 2.5 metros.

Ensayos

Se tomaron muestras con un tubo Shelby de pared delgada y se realizaron ensayos de humedad, límites de Atterberg y de peso específico cuyos resultados se pueden evidenciar en el ANEXO 4.

Resultados

Para la construcción de este proyecto se diseñó un sistema de zapatas aisladas y corridas a una profundidad de 1,5 metros, en un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH) y con una capacidad portante de 5.84 Ton / m², con unos asentamientos esperados de 3 a 4 cm y con unas cargas máximas de 80 toneladas.

7.1.3 ESTUDIO DE SUELOS 3

Descripción

Edificación construida en el barrio bonanza, que planea la construcción de un edificio de cuatro pisos, en una estructura de concreto reforzado y modulado con luces de 3,5 a 5,5 metros y adicional se muestra otras características del estudio como se muestra en la

Tabla 21 con una carga por columna de 40 toneladas.

Tabla 21. Información estudio de suelos 3

estudio de suelos 3	
localización	TRANSV 66A NO 78-94
Microzonificación	
respuesta sísmica	lacustre 200
zonas geotécnicas	lacustre A
sondeos	
Cantidad	2
Profundidad	4,7 m
Ensayos	
humedad natural, límites, peso unitario, compresión inconfiada	

Fuente: Propia

Exploración del subsuelo

Para la exploración del subsuelo, en cada una de las perforaciones se efectuó, una descripción visual, de los diferentes estratos encontrando valores para veleta y para penetrómetro manual, a su vez obteniendo muestras inalteradas mediante tubos Shelby determinando a su vez el nivel freático.

Perfil estratigráfico

A partir de los registros de campo e interpretación de los resultados de laboratorio se tipificó la estratigrafía representada en la Tabla 22.

Tabla 22. Perfil estratigráfico estudio de suelos 2

estrato	Profundidad (m)	Descripción
1	0.00 - 0.50	Capa vegetal, limo negro
2	0.50 - 1.30	Limo arcilloso con pintas grises
3	1.30 - 1.50	Arcilla de plasticidad media

4	1.50 - 4.70	Arcilla amarilla de consistencia alta
---	-------------	---------------------------------------

Fuente: Propia

Nivel freático

en el momento de efectuar los sondeos se determinó que hay un nivel freático a una profundidad de 2.2 metros.

Ensayos

Se tomaron muestras con un tubo Shelby de pared delgada y se realizaron ensayos de humedad, límites de Atterberg y de peso específico cuyos resultados se pueden evidenciar en el ANEXO 5

Resultados

Se determinó hacer la cimentación con zapatas aisladas con vigas de rigidez a una profundidad de 1,4 metros en un estrado de MH-OH con una capacidad portante de 12 ton / m² con unos asentamientos esperados de 1 a 2 cm.

PARÁMETROS PARA SUELO SIN TRATAR

Con base en la recopilación de los estudios de suelos se determinan las propiedades naturales del suelo, estableciendo una media de los resultados de los ensayos en compresión inconfiada y peso específico sobre los suelos arcillosos de alta plasticidad, adicional revisando y comparando los estudios de suelos con la literatura investigada.

Para poder determinar la resistencia no drenada al corte, teniendo en cuenta las condiciones no drenadas no consolidadas, en efecto, de tomar los resultados de compresión inconfiada, por tanto, se tomó como la mitad del promedio de la compresión inconfiada la cual tomó un valor de 50 kPa, ya que los valores de los estudios de suelos están entre los 30 kPa y los 70 kPa, para arcillas de alta compresibilidad en los estudios de suelos

El valor de peso específico se tomó como la media de los valores de los ensayos en los estudios de suelos, ya que los valores de peso específico saturado para arcillas de alta compresibilidad están entre los 15 kN/m³ y los 18 kN/m³.

Adicional se establece que el módulo de elasticidad es de 10 Mpa con base en literatura consultada y aunque el coeficiente de Poisson fue adoptado como 0,35 debido a las limitaciones del programa; adicionalmente para arcillas en condiciones no drenadas no consolidadas se asume un Ángulo de fricción igual a 0.

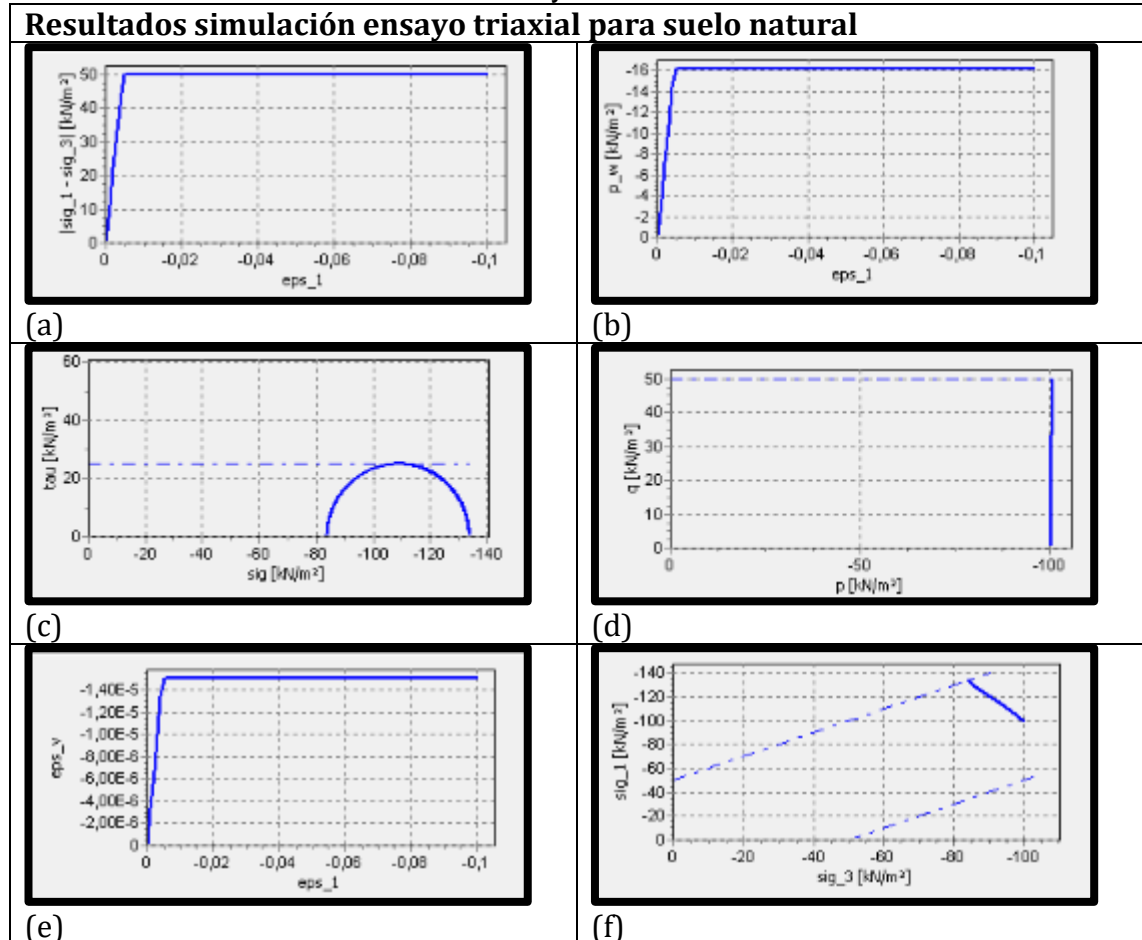
Figura 22. Propiedades del suelo natural

Identification: arcilla natural		
Material model: Mohr Coulomb		
Stiffness		
ν (nu)	0,35	
E_{ref}	10000	kN/m ²
Strength		
c_{ref}	25	kN/m ²
ϕ (phi)	0	°
ψ (psi)	0	°
Properties		
γ_{unsat}	16	kN/m ³
γ_{sat}	16,5	kN/m ³

Fuente: Propia

En relación a dichas propiedades vistas en la Figura 22 se puede hacer una simulación del ensayo de triaxial en condiciones no drenadas de la cual se obtienen las gráficas que se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados simulación ensayo triaxial suelo natural



Fuente: Propia

el objetivo de un triaxial es evaluar el suelo en las condiciones en las que se encuentran en estado natural , midiendo la resistencia al corte, estableciendo las relaciones entre esfuerzo y deformación, en la gráfica d podemos denotar que se usó una presión de cámara de 100 kPa dándonos así las propiedades del suelo como lo muestra en la gráfica c que se usó una resistencia no drenada al corte de 25 kPa dando un sigma 1 de -85 kPa y un sigma 3 de 135 kPa y mostrándonos el comportamiento del suelo en cuestión en estado natural.

7.2 DOCUMENTACIÓN LITERARIA ESTUDIOS DE ESTABILIZACIÓN CON CAL HIDRATADA

Se realizó una recopilación de diferentes estudios los cuales han hecho el proceso de la estabilización de cal hidratada y se ha evaluado los parámetros de resistencia mecánicos del suelo, con el fin de entender cómo se comportan estos y como varían en función de la adición de cal hidratada en suelos arcillosos de alta plasticidad.

Tabla 24. Resumen papers o artículos de estabilización con cal indagados

AUTOR	TIPO SUELO (SUCS)	γ_d (KN/m ³)	CONTENIDO CAL (%)	TIEMPO CURADO (d)	qu (kPa)
(THOMAS W. KENNEDY) Dalco clay	CH	15	7	7	896.5
			4	7	758.4
			0	0	68.5
(THOMAS W. KENNEDY) Beaumont clay	CH	15.5	7	7	551.58
			4	7	482.6
			0	0	344.73
(Jair A. Baldovino, 2017)	CH	13.8	9	14	1176.63
			7	14	902.17
			5	14	789.98
			3	14	530.38
			0	14	356.1
(Nilo Cesar Consoli, Amanda Dalla Rosa, & Rodrigo Beck Saldanha, 2014)BRS-lime specimens,	CH	15	9	7	129.8
			7	7	110.2
			5	7	90.6
			3	7	71
(Higuera Sandoval, Gomez Cristancho, & Pardo Naranjo, 2012)	CH	17.45	0	7	235.3
		16.57	2	7	343.23
		16.31	4	7	372.65
		16.06	6	7	441.29
		15.93	8	7	343.23
		15.73	10	7	382.45
		15.31	12	7	323.61

Fuente: Propia

Observando los comportamientos de los parámetros de resistencia de los suelos estabilizados con cal se denota, que hay tendencias marcadas con las cuales se hizo la estimación de los parámetros de resistencia.

Se señala que los pesos unitarios secos disminuyen con relación a la adición de cal en rangos de $0,5 \text{ kN/m}^3$ a $0,1 \text{ kN/m}^3$ cada 2 % de cal, en promedio de $0,1 \text{ kN/m}^3$ cada 1% de adición de cal; por lo que se asumió datos de $16,3 \text{ kN/m}^3$ y $16,1 \text{ kN/m}^3$ para los porcentajes de 3% y 5% de cal respectivamente.

Adicional que los valores resistencia no drenada al corte y módulo de elasticidad aumentan y con relación al tiempo de curado tienden a ser mucho más superiores. Al tomar un curado de 7 días si se tiene en cuenta que la estos parámetros de resistencia pueden tomar valores superiores.

En cuanto a la resistencia no drenada al corte, se hizo uso de las regresiones presentadas por el suelo presentado en el tercer artículo de la Tabla 24 y haciendo un ajuste de acuerdo la resistencia no drenada a la corte tomada en los parámetros de suelos sin tratar (Nilo Cesar Consoli, Amanda Dalla Rosa, & Rodrigo Beck Saldanha, 2014)

y finalmente para estimar los valores de módulo se realizó el procedimiento expuesto por (Rodríguez, 2002) el cual permite predecir deformaciones de problemas de cimentaciones en los suelos blandos de la ciudad de Bogotá (Rodríguez, Case Study of a Deep Excavation in Soft Soils and Complex, 2005).

Este método parte de la medición del módulo de deformación de los suelos en el terreno a muy bajas deformaciones por medio de ensayos geofísicos o correlación con otros ensayos. Estos valores se ajustan, posteriormente, para tener en cuenta la variación del módulo de rigidez con la deformación y con la presión de confinamiento (Duncan, 1970)

DEFINICIÓN PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA LAS DOSIFICACIONES DE CAL

Con base en la documentación bibliográfica de los estudios de suelos estabilizados con cal, se reportaron tendencias a la disminución del peso específico con el porcentaje de cal, adicional hay un aumento de la resistencia no drenada al corte y del módulo de elasticidad, por lo que se asumieron dos porcentajes de cal inferiores al

SUELOS DEFINIDOS

Figura 23. Propiedades del suelo 3% cal

(a)

Identification: arcilla 3%		
Material model: Mohr Coulomb		
Stiffness		
ν (nu)	0,35	
E_{ref}	12000	kN/m ²
Strength		
c_{ref}	35	kN/m ²
ϕ (phi)	0	°
ψ (psi)	0	°
Properties		
γ_{unsat}	15,8	kN/m ³
γ_{sat}	16,3	kN/m ³

Fuente: Propia

Figura 24. Propiedades del suelo 5% cal

(b)

Identification: arcilla 5%		
Material model: Mohr Coulomb		
Stiffness		
ν (nu)	0,35	
E_{ref}	14000	kN/m ²
Strength		
c_{ref}	40	kN/m ²
ϕ (phi)	0	°
ψ (psi)	0	°
Properties		
γ_{unsat}	15,6	kN/m ³
γ_{sat}	16,1	kN/m ³

Fuente: Propia

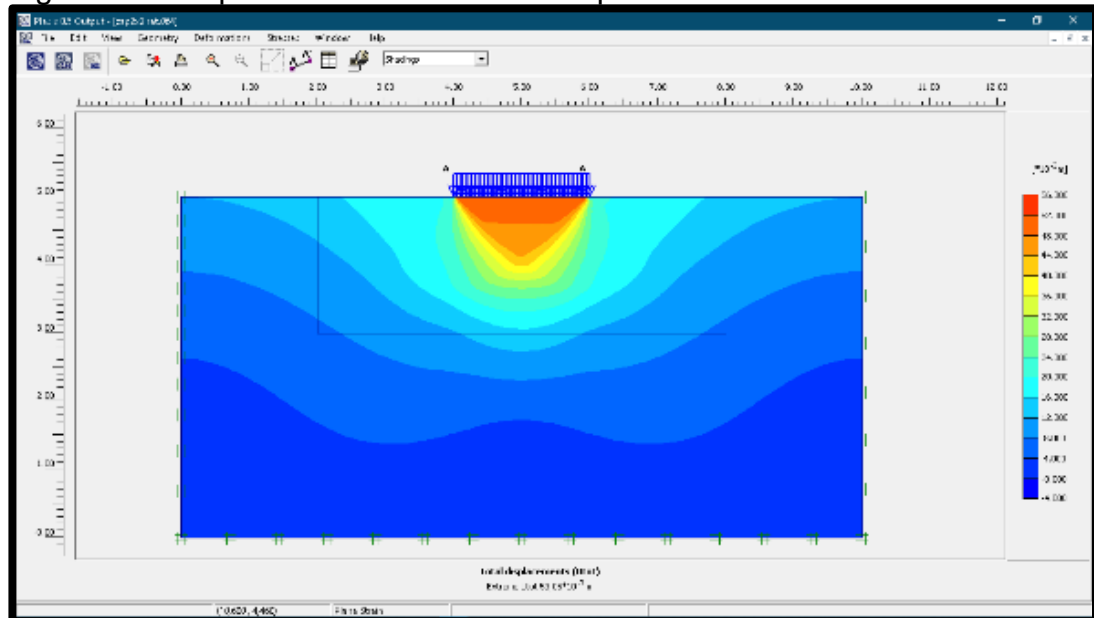
7.3. MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Luego de realizar los cálculos, el programa permite observar una gran gama de visualizaciones, con degradados de color, flechas, cruces entre otros y para diferentes casos como desplazamientos, esfuerzos efectivos, esfuerzos totales, permitiendo hacer cortes y trayectorias de las zonas que se quieran estudiar.

En la

Figura 25 se puede evidenciar el tipo de falla general, que es acorde con el tipo de falla planteado y con la teoría de capacidad de carga semi empírica adoptada y se muestra la visualización de los desplazamientos totales mostrando que hay asentamientos elásticos máximos de 5.3 mm adicional se muestra la forma en la que ocurrirán dichos desplazamientos siendo la zona naranja el lugar con mayores deformaciones, y sucesivamente llegando al color azul donde las deformaciones son cero.

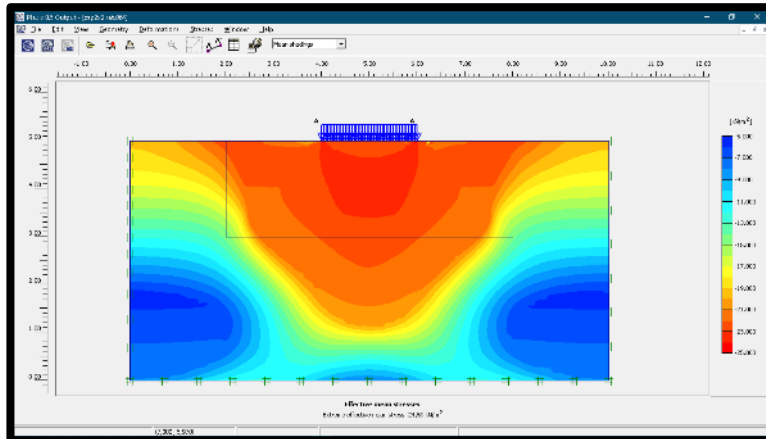
Figura 25. Desplazamientos totales de zapata 2m x 2m suelo natural



Fuente: Propia

También es importante evaluar los esfuerzos efectivos llegando a un valor máximo de -24,59 KPa y verificando que se presente una distribución pertinente a dicho esfuerzo corroborando que se haya presentado bien la modelación como se muestra en la Figura 26.

Figura 26. Esfuerzos efectivos para zapatas 2mx2m en suelo natural

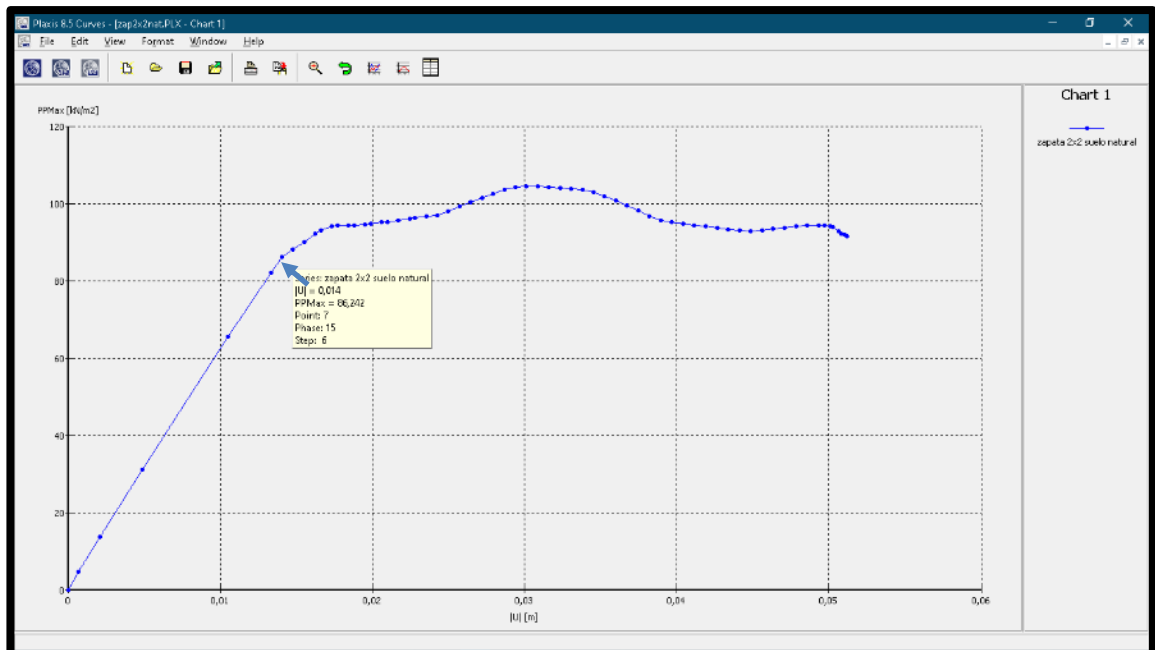


Fuente: Propia

Posteriormente se obtiene la gráfica de deformación VS carga de la cual se obtiene que para una zapata cuadrada de 2m x 2m y para el suelo natural se obtiene una gráfica con dos zonas una elástica y una plástica separadas por la línea azul en la Figura 27; de la cual en la elástica se tienen bajas deformaciones a cambios constantes de carga y en la plástica se obtienen grandes deformaciones a bajos cambios de carga.

Estableciendo el punto de inflexión y por tanto la capacidad portante en 86,242 KPa así como unos asentamientos máximos de 5,1 cm antes de llegar al fallo del suelo como se puede apreciar en la Figura 27.

Figura 27. Gráfica de deformación VS carga para zapata cuadrada de 2m x 2m con suelo natural



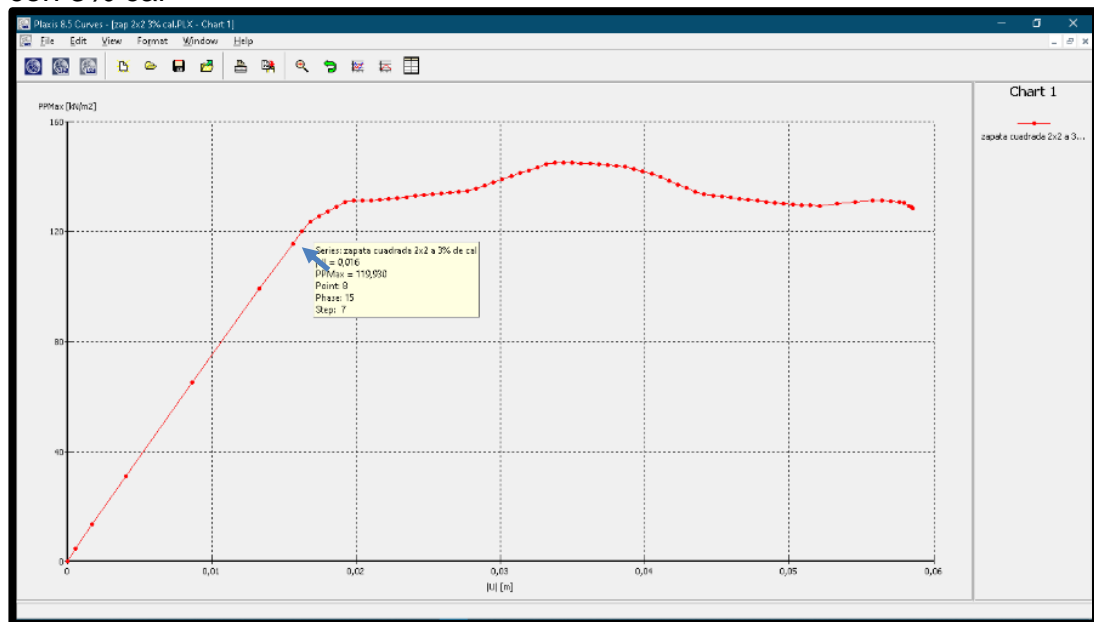
Fuente: Propia

Obteniendo la gráfica de deformación VS carga de la cual se obtiene que para una zapata cuadrada de 2m x 2m con una dosificación del 3 % de cal se obtiene una gráfica con dos zonas una elástica y una plástica separadas por la línea azul en la

Figura 28; de la cual en la elástica se tienen bajas deformaciones a cambios constantes de carga y en la plástica se obtienen grandes deformaciones a bajos cambios de carga.

Estableciendo el punto de inflexión y por tanto la capacidad portante en 119.93 KPa así como unos asentamientos máximos de 5,8 cm antes de llegar al fallo del suelo como se puede apreciar en la Figura 28.

Figura 28. Gráfica de deformación VS carga para zapata cuadrada de 2m x 2m con 3% cal



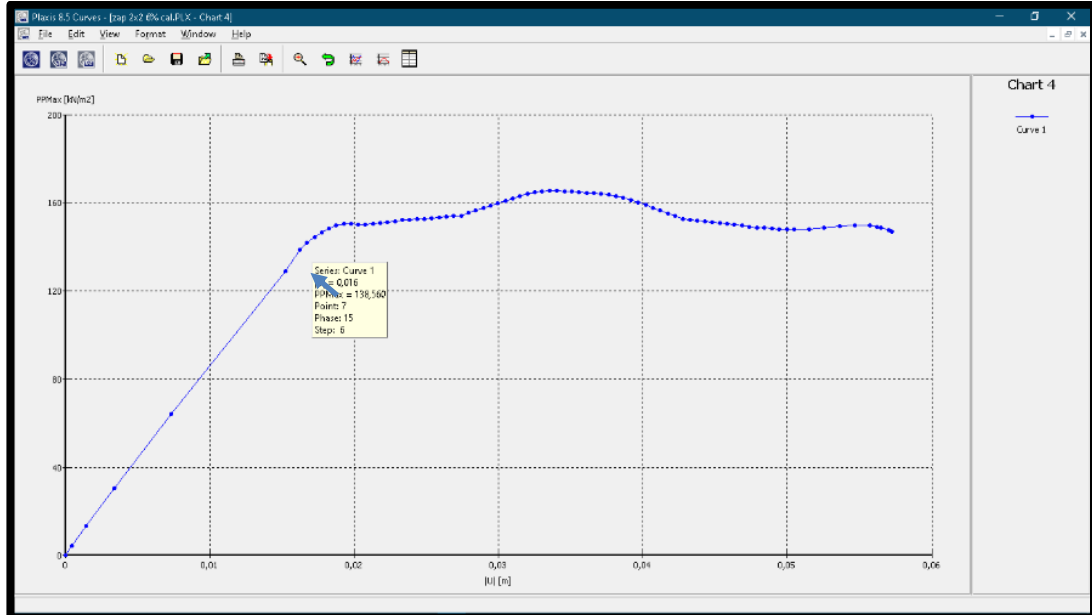
Fuente: Propia

Posteriormente se obtiene la gráfica de deformación VS carga de la cual se obtiene que para una zapata cuadrada de 2m x 2m con una dosificación del 5 % de cal se obtiene una gráfica con dos zonas una elástica y una plástica separadas por la línea azul en la Figura 29; de la cual en la elástica se tienen bajas deformaciones a cambios constantes de carga y en la plástica se obtienen grandes deformaciones a bajos cambios de carga.

Estableciendo el punto de inflexión y por tanto la capacidad portante en 138.56 KPa así como unos asentamientos máximos de 5,7 cm antes de llegar al fallo del suelo como se puede apreciar en la Figura 29 y de la cual podemos interpretar que es el suelo con mejores resultados de resistencia a una

dosificación de cal, pero hay que tener en cuenta que estos son valores hipotéticos con base en literatura de diferentes estudios de suelos arcillosos de alta plasticidad estabilizados con cal hidratada.

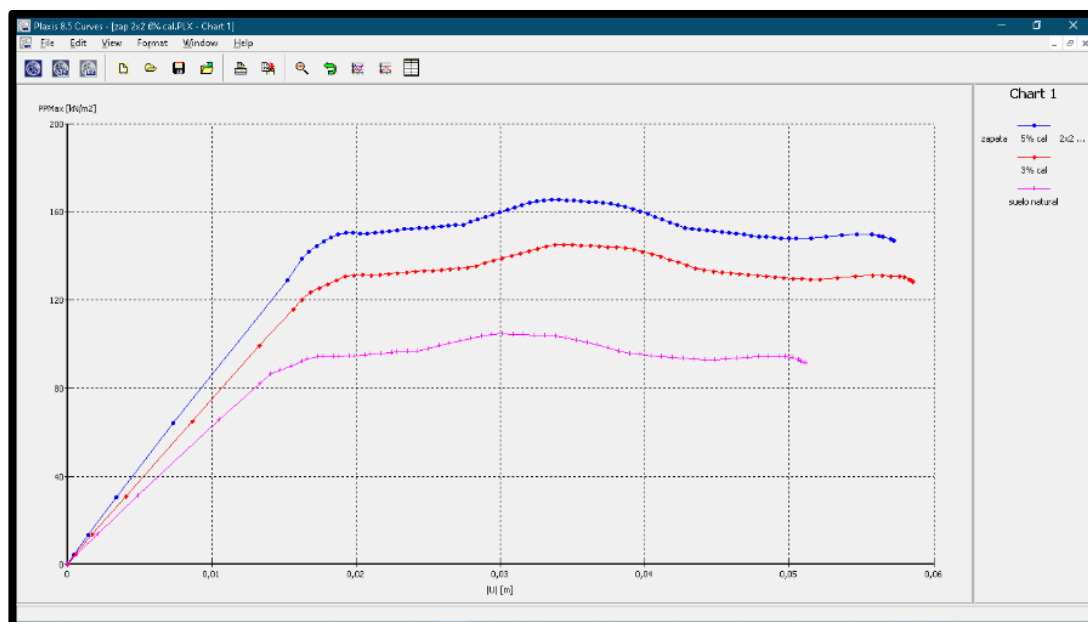
Figura 29. Gráfica de deformación VS carga para zapata cuadrada de 2m x 2m con 5 % cal



Fuente: Propia

Finalmente se obtiene la Figura 30 en la cual podemos observar claramente que el suelo con 5 % de cal marcado con una línea azul es el que brinda mejores resultados de resistencia.

Figura 30. Gráfica de deformaciones VS carga para los suelos estudiados



Fuente: Propia

con base en los valores obtenidos en el software se procede a realizar los ábacos de diseño obteniendo tanto como la capacidad de carga última, como la capacidad de carga admisible; por lo cual se calcula la capacidad de carga última para zapatas desde los 0,5 m de base hasta los 2m para cada tipo de suelo, llegando a los valores obtenidos en la Tabla 25.

Tabla 25. Capacidad de carga última teórica por medio de FEM

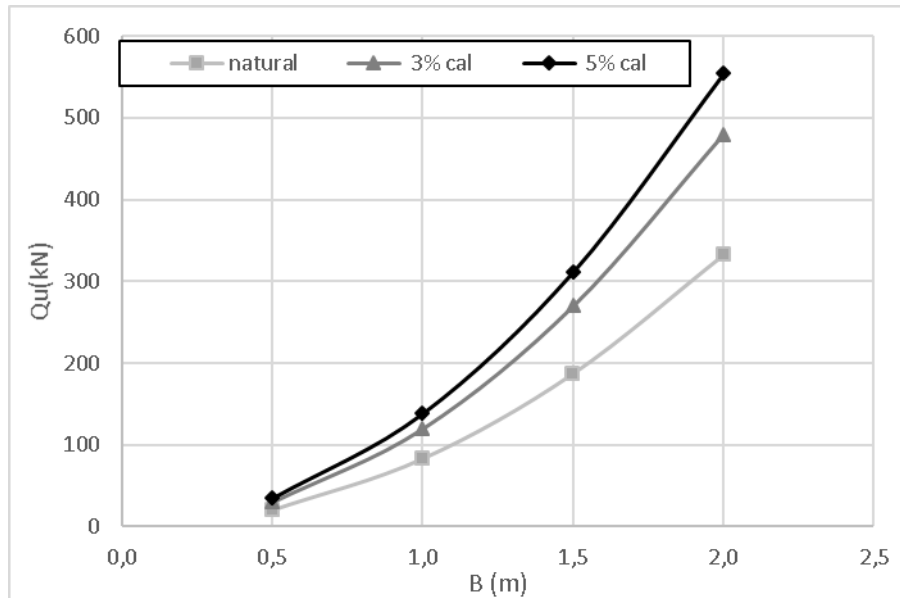
Tipo de suelo	natural	3% cal	5% cal
qu (KPa)	83,2	119,9	138,5
dimensión (m)	Qu (KN)	Qu (KN)	Qu (KN)
0,5	20,8	30,0	34,6
1,0	83,2	119,9	138,5
1,5	187,3	269,8	311,7
2,0	333,0	479,7	554,1

Fuente: Propia

De los valores de la

Tabla 25, anteriormente mencionada podemos señalar que los valores de capacidad de carga última aumentan en relación a el tamaño de la zapata y a el porcentaje de cal.

Figura 31. Capacidad de carga última VS base a diferentes dosificaciones de cal



Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura 31 a mayores dimensiones de zapatas hay mayor capacidad de carga última y se requieren unas dimensiones menores de zapatas cuando el suelo fue estabilizado con cal para llegar a capacidades últimas de carga similares.

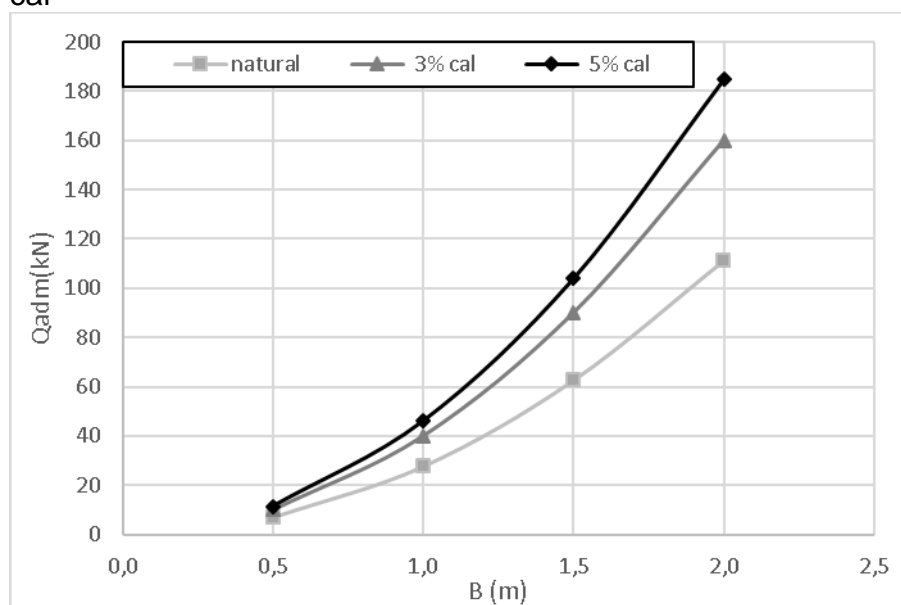
Tabla 26. Capacidad de carga admisible teórica por medio de FEM

Tipo de suelo	natural	3% cal	5% cal
q_u (KPa)	83,2	119,9	138,5
dimensión (m)	Q adm (KN)	Q adm (KN)	Q adm (KN)
0,5	6,9	10,0	11,5
1,0	27,7	40,0	46,2
1,5	62,4	89,9	103,9
2,0	111,0	159,9	184,7

Fuente: Propia

Comprobando el comportamiento de las anteriores gráficas, hallando el gráfico de capacidad de carga admisible. Se realizaron los ábacos mostrados en la Figura 32; de la cual se comprueba el comportamiento que anteriormente se indicó, como primer punto hay un aumento considerable de la capacidad portante en función de cal hidratada y como segunda medida con el uso de cal hidratada se pueden generar disminuciones tanto en dimensiones como en volúmenes de excavación.

Figura 32. Capacidad de carga admisible VS base a diferentes dosificaciones de cal



Fuente: Propia

7.4 OBTENCIÓN DE CAPACIDAD PORTANTE TEÓRICA POR MÉTODO SEMIEMPÍRICO

Haciendo uso de la ecuación general de capacidad de carga de Terzaghi ecuación 3. descrita en 2.9 TEORÍAS DE CAPACIDAD DE CARGA, se calculó la capacidad portante teórica del suelo natural y con porcentajes de 3% y 5% como se muestra en la Tabla 27.

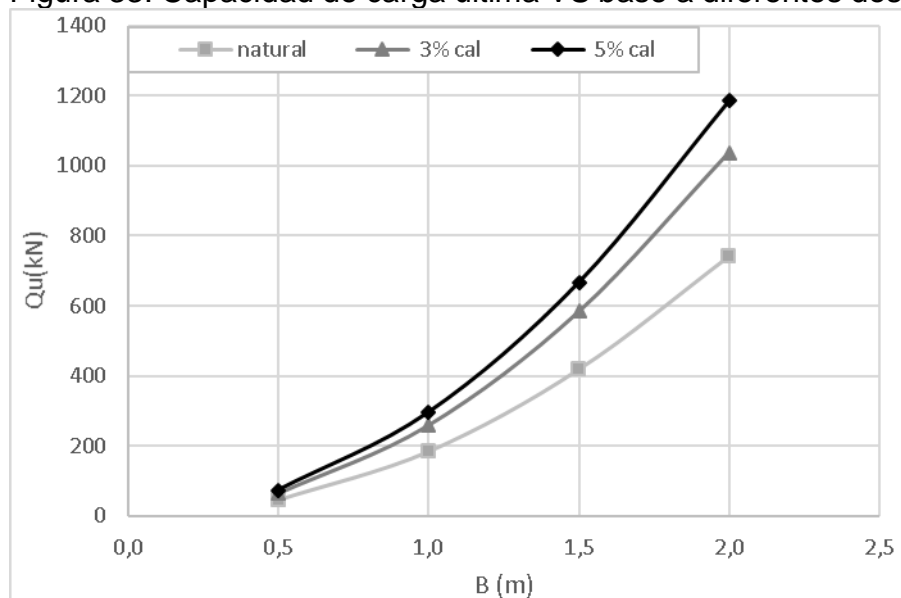
Tabla 27. Capacidad de carga última teórica por medio de Terzaghi

Tipo de suelo	Natural	3% cal	5% cal
Cu	25,0	35,0	40,0
qu(kPa)	185,3	259,4	296,4
Dimensión (m)	Qu (KN)	Qu (KN)	Qu (KN)
0,5	46,3	64,8	74,1
1,0	185,3	259,4	296,4
1,5	416,8	583,5	666,9
2,0	741,0	1037,4	1185,6

Fuente: Propia

De estos resultados se puede definir que hay un aumento considerable de la capacidad portante al hacer uso de cal hidratada como producto estabilizante adicional; que con un 5 % se generan mejores resultados,

Figura 33. Capacidad de carga ultima VS base a diferentes dosificaciones de cal



Fuente: Propia

Con base en la

Tabla 27 se puede definir la capacidad de carga admisible, haciendo uso de un factor de seguridad de tres y permitiendo llegar tanto a la

Figura 33 como a la

Tabla 28.

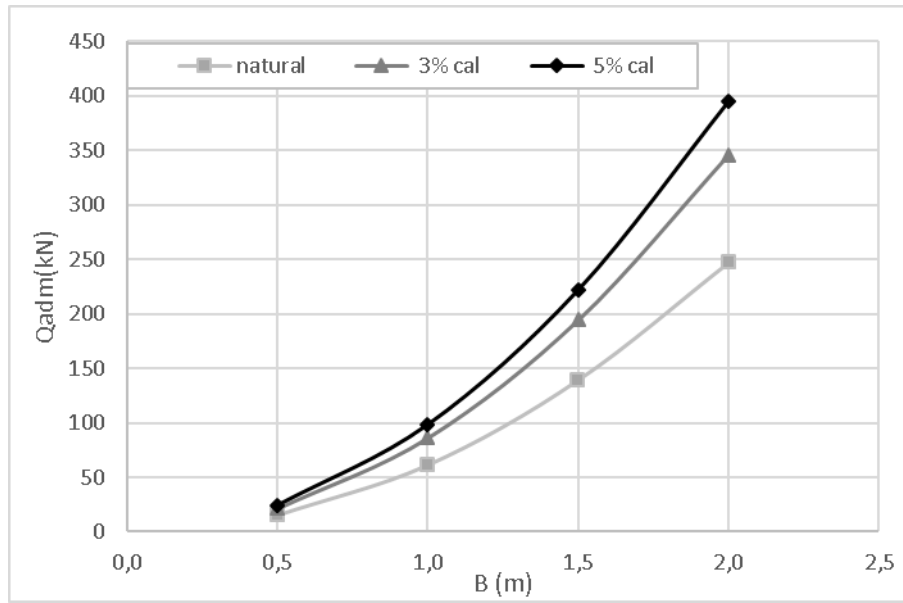
Tabla 28. Capacidad de carga admisible teórica por medio de Terzaghi

Tipo de Suelo	Natural	3% cal	5% cal
Cu	25,0	35,0	40,0
qu(kPa)	185,3	259,4	296,4
Dimensión (m)	Q adm (KN)	Q adm (KN)	Q adm (KN)
0,5	15,4	21,6	24,7
1,0	61,8	86,5	98,8
1,5	138,9	194,5	222,3
2,0	247,0	345,8	395,2

Fuente: Propia

Dichos valores de capacidad de carga admisible son los valores teóricos que se usarían para diseñar la estructura generando ábacos de diseño como los mostrados en la Figura 34, en cuanto a las dimensiones de la zapata vemos que una zapata cuadrada de 1,5 metros apoyada sobre el suelo dosificado de cal hidratada al 5%, puede llegar a ser equivalente a una zapata de 2 metros apoyada en suelo sin tratar, por lo que se generan disminuciones en costos de excavación y dimensiones de las zapatas

Figura 34. Capacidad de carga admisible VS base a diferentes dosificaciones de cal



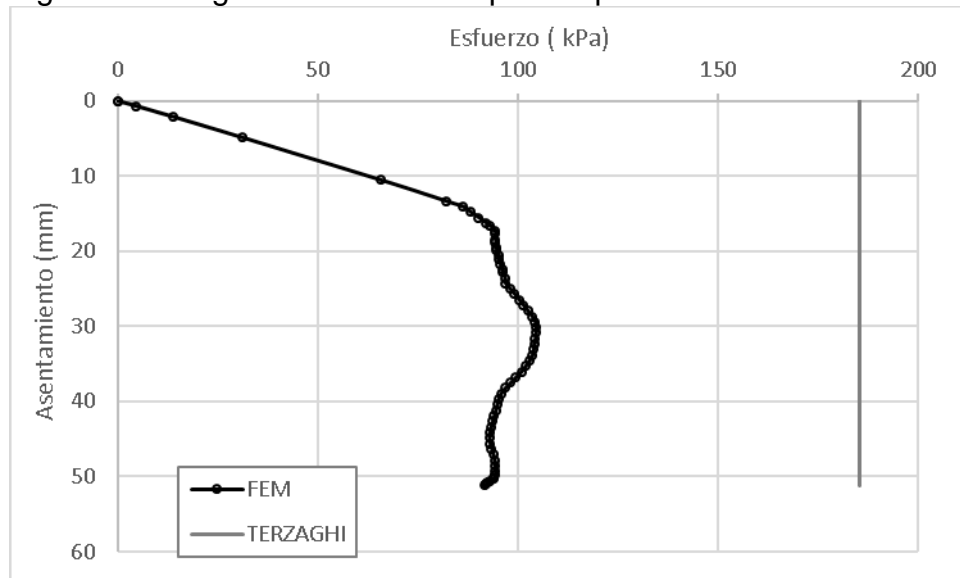
Fuente: Propia

7.5 COMPARACIÓN FEM VS TERZAGHI

Para la comparación de los modelos tanto de FEM como de Terzaghi hay que denotar que este último no tiene en cuenta los asentamientos por lo que establece que hay una capacidad de carga última y esta será la que se usa para diseñar mientras, los modelos de FEM permiten evaluar tanto los asentamientos como la capacidad de carga del suelo.

Como se muestra en la Figura 35 el método FEM es más preciso puesto que la capacidad portante que indica es de 86, 242 kPa mientras que Terzaghi indica que para este caso (suelo natural) la capacidad portante es de 185,3 kPa Y adicional se interpreta que por asentamientos se puede cargar el suelo hasta 99,18 kPa para obtener un asentamiento permisible de 2,5 cm pero encontrando que este ya se encuentra en la zona plástica del suelo por lo que no es recomendable cargar el suelo a estas cargas.

Figura 35. Carga VS deformación para zapata cuadrada de 2mx2m suelo natural

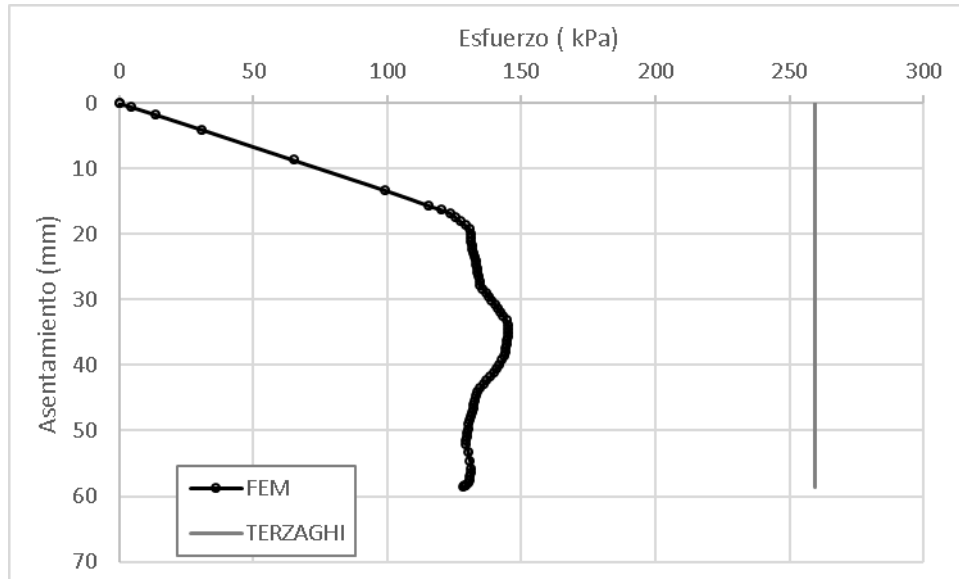


Fuente: Propia

Realizando el mismo proceso para el suelo con 3% de cal se encuentra que el método FEM es más preciso puesto que la capacidad portante que indica es de 119, 93 kPa mientras que Terzaghi indica que para este caso (suelo 3% cal) la capacidad portante es de 259.4 kPa Y adicional se puede ver que por asentamientos se puede cargar el suelo hasta 133,70 kPa para obtener un asentamiento permisible de 2,5 cm pero encontrando que este ya se encuentra

en la zona plástica del suelo por lo que no es recomendable cargar el suelo a estas cargas como se puede apreciar en la Figura 36.

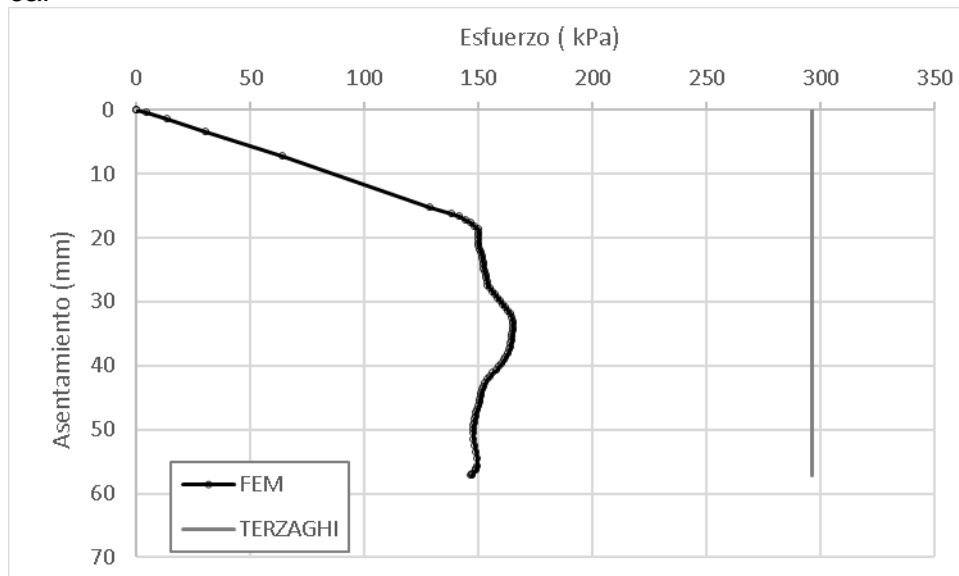
Figura 36. Carga VS deformación para zapata cuadrada de 2mx2m suelo 3% de cal



Fuente: Propia

Finalmente se puede ver que en las tres gráficas el método FEM por medio del software Plaxis da una estimativa más precisa. No obstante, debe ser comparada con otras teorías de capacidad de carga.

Figura 37. Carga VS deformación para zapata cuadrada de 2mx2m suelo 5% de cal



Fuente: Propia

En cuanto a la capacidad de carga del suelo, se realizó la comparación de las dos metodologías para los diferentes tipos de suelo obteniendo los valores mostrados en la Tabla 29.

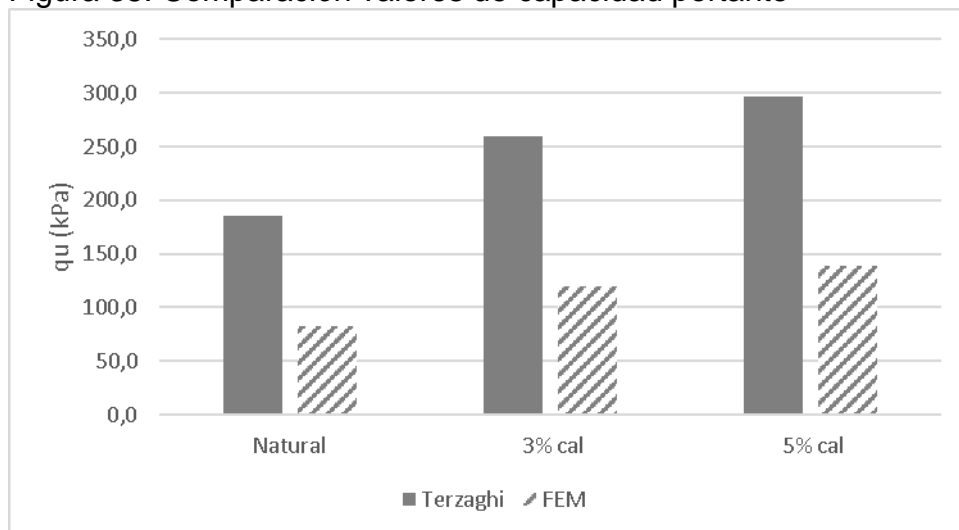
Tabla 29. Capacidad de carga valores comparativos

Método	Unidades	Natural	3% cal	5% cal
Terzaghi	qu (kPa)	185,3	259,4	296,4
FEM	qu (kPa)	83,2	119,9	138,5

Fuente: Propia

Conviene subrayar que los valores de FEM son poco menos de la mitad de los valores de Terzaghi por lo que se podría decir que estos valores son más conservadores y teniendo en cuenta que estudian más parámetros de resistencia del suelo como el módulo de elasticidad, asentamientos, entre otros; se puede concluir que estos datos son más precisos.

Figura 38. Comparación valores de capacidad portante



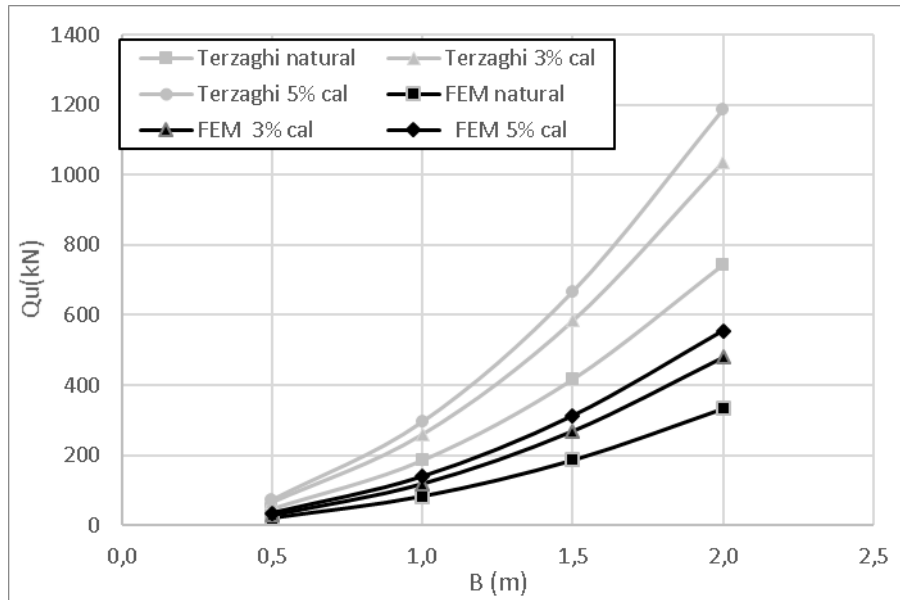
Fuente: Propia

De la Figura 38 podemos interpretar que bajo las dos metodologías empleadas la capacidad portante del suelo en función de cal aumenta, adicional que la metodología de Terzaghi explica de manera correcta y fundamenta diferentes ecuaciones, pero no contempla diferentes condiciones del suelo como los asentamientos, por lo que diseñar con esta implica inexactitudes y posibles errores.

Así mismo como se ve en la Figura 39 y reforzando los puntos anteriormente expresados las capacidades de carga por Terzaghi son mayores a los del método FEM y teniendo en cuenta que estos valores por Terzaghi son sobre estimados es recomendable usar los valores de diseño para el método FEM

demarcados con las series negras. Y adicional es importante decir que estos valores permiten un diseño por asentamientos permisibles oportunidad que no brinda la teoría de Terzaghi.

Figura 39. Comparación capacidad de carga admisible VS base a diferentes dosificaciones de cal



Fuente: Propia

8. CONCLUSIONES

Como primera medida bajo las dos metodologías empleadas, la capacidad portante del suelo en función de cal hidratada aumenta, por lo que es posible afirmar que la cal hidratada mejora los parámetros de resistencia de un suelo arcilloso en la sabana de Bogotá, adicional que la metodología de Terzaghi explica de manera correcta y fundamenta diferentes ecuaciones, pero no contempla diferentes condiciones del suelo como los asentamientos, por lo que diseñar con esta implica posibles errores.

En segundo lugar, se puede señalar que una zapata cuadrada apoyada sobre el suelo dosificado de cal hidratada al 5% presenta mejores resistencias que una zapata apoyada en suelo sin tratar, es decir brinda mayores capacidades portantes, por lo que se generan disminuciones en costos de excavación y dimensiones de las zapatas, ya que se pueden construir a desplantes menores o con menores dimensiones y obtener una capacidad portante similar.

Por un lado, es importante señalar que Terzaghi no tiene en cuenta diferentes factores del suelo como lo son los asentamientos, por lo que se puede sobreestimar la capacidad de carga del suelo y generar asentamientos no admisibles.

Por otro lado, es importante denotar que el software Plaxis da una estimativa más precisa. No obstante, debe ser comparada con otras teorías de capacidad de carga con fin de estimar con una mayor certeza el comportamiento que tendrá el suelo.

En conclusión y dando respuesta a la problemática presentada la acción de cal hidratada reduce los pesos específicos del suelo arcilloso, aumentando tanto resistencia no drenada al corte, como el módulo de elasticidad; por tanto, la cal hidratada es un material idóneo para poder realizar mejoras en los parámetros de resistencia del suelo, y mejorar la capacidad portante de un suelo arcilloso de alta plasticidad en la sabana de Bogotá.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1 Enero 1966). *T 220 Standard Method of Test for Determination of the Strength of Soil-Lime Mixtures*.
- AENOR. (2012). *UNE-EN 459-1:2012 Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*. Madrid.
- Altamirano Navarro, G. J., & Díaz Sandino, A. E. (2015). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí- Rivas*. Managua.
- Alvarez, J. C., & Echeverri, J. D. (1999). *Estabilización de arcillas expansivas con cal hidratada*. Medellín: Universidad Nacional.
- ASTM-C977-18. (2018). *Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization*. ASTM International.
- ASTM-D6276-19. (2019). *Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization lime content*. West Conshohocken: ASTM International.
- Beltrán Parra, M. A., & Copado Beltrán, J. A. (2011). *Estabilización de un Suelo Arcilloso con Cal Hidratada, Para Ser Utilizada Como Capa Subrasante de Pavimentos en la Colonia San Juan Caspitran de ciudad Obregón*. Obregón.
- Braja, M. D. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cruz Manca, Santa Fe: Cengage Learning.
- Bustamante Herman, A. (2011, Febrero). modelaje geotécnico por elementos finitos y comprobación instrumental de la exactitud lograda.
- Castelló Bauzá, J. D. (2003, Enero 30). *Estabilización De Suelos Con CAL. Mezclas con cemento en las infraestructuras del transporte*. Madrid, España.
- Consoli NC, P. P. (2014). Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil. Transportation.
- D. O., & Department Of The Army. (1994, Octubre 25). *Soil Stabilization For Pavements. ARMY TM 5-822-14*. Washington D. C., United States Of America.
- FOPAE. (2011). *Procesamiento e Interpretación De Señales De La Red De Acelerógrafos De Bogotá 2009 A 2011*. Bogota D.C.
- FOPAE, & Alcaldía Mayor de Bogotá. (2010, Diciembre 16). *Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C*. Bogota D.C: Secretaria Distrital de Planeación.
- García, C. A., & Escamilla, A. L. (2011). modelamiento de problemas de estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos. Bucaramanga, Colombia.

- Ghobadi MH, A. Y. (2014). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology*.
- Gómez, M. G. (2018). ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO CON CAL Y CENIZA VOLANTE. Bogota D.C.
- Higuera Sandoval, J. C., Gomez Cristancho, J. C., & Pardo Naranjo, O. E. (2012). *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio*. Colombia.
- IDU. (07 de Abril 2020). *Precios Unitarios De Referencia 2019-II + Mano de Obra 2020*. Colombia.
- INVIAS. (2012). Sección !00 - Suelos. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras. Colombia.
- INVIAS. (2013). Sección 600 , *Especificaciones Generales de Construcción de carreteras y Normas de Ensayo de materiales para carreteras*. colombia.
- Jair A. Baldovino, E. B. (2017). Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in.
- M, K., & A, M. (2014). Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay.
- Negawo WJ, D. E. (2017). Lime-stabilisation of high plasticity swelling clay from Ethiopia. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- NLA, N. (2004). *Soil Treated With Lime Construction Manual*.
- Patzán, J. E. (2009, Mayo). Guía práctica para el cálculo de capacidad de Carga en cimentaciones superficiales, losas de Cimentación, pilotes y pilas perforadas. Guatemala: Universidad De San Carlos Guatemala.
- Prokopovich, N. (1979). *Genetic Classification Onland Subsidence*. Florida: Am. Soc. Civil Eng.
- Rodriguez, J. A., & Velandia, E. (2008). *Optimización de Cimentaciones en suelos blandos de Bogotá*. Bogotá D.C.
- Salas, M., Atienza, M., Díez De Dios, J. A., EJ, G., & al, e. (2010, DICIEMBRE 3). Recomendaciones para la redacción de: pliegos de especificaciones técnicas generales para el tratamiento de los suelos con cal. Andalucía.
- SCG, S. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10- Título H. Colombia.
- SGC, S. G. (2015). *mapa geológico de colombia 2015*. From [https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/geoportal.aspx#:](https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/geoportal.aspx#:http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Mapa_Geologico_colombiano_2015/)
http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Mapa_Geologico_colombiano_2015/
- Thompson. (1965). Split-tensile strength of lime-stabilized soils. *Highway Research*.
- Waterman, D., & R. Al-Khoury, K. B. (n.d.). Plaxis 2D - version 8 .

ANEXOS

ANEXO 1. MAPA DE ZONAS GEOLOGICAS MICROZONIFICACION

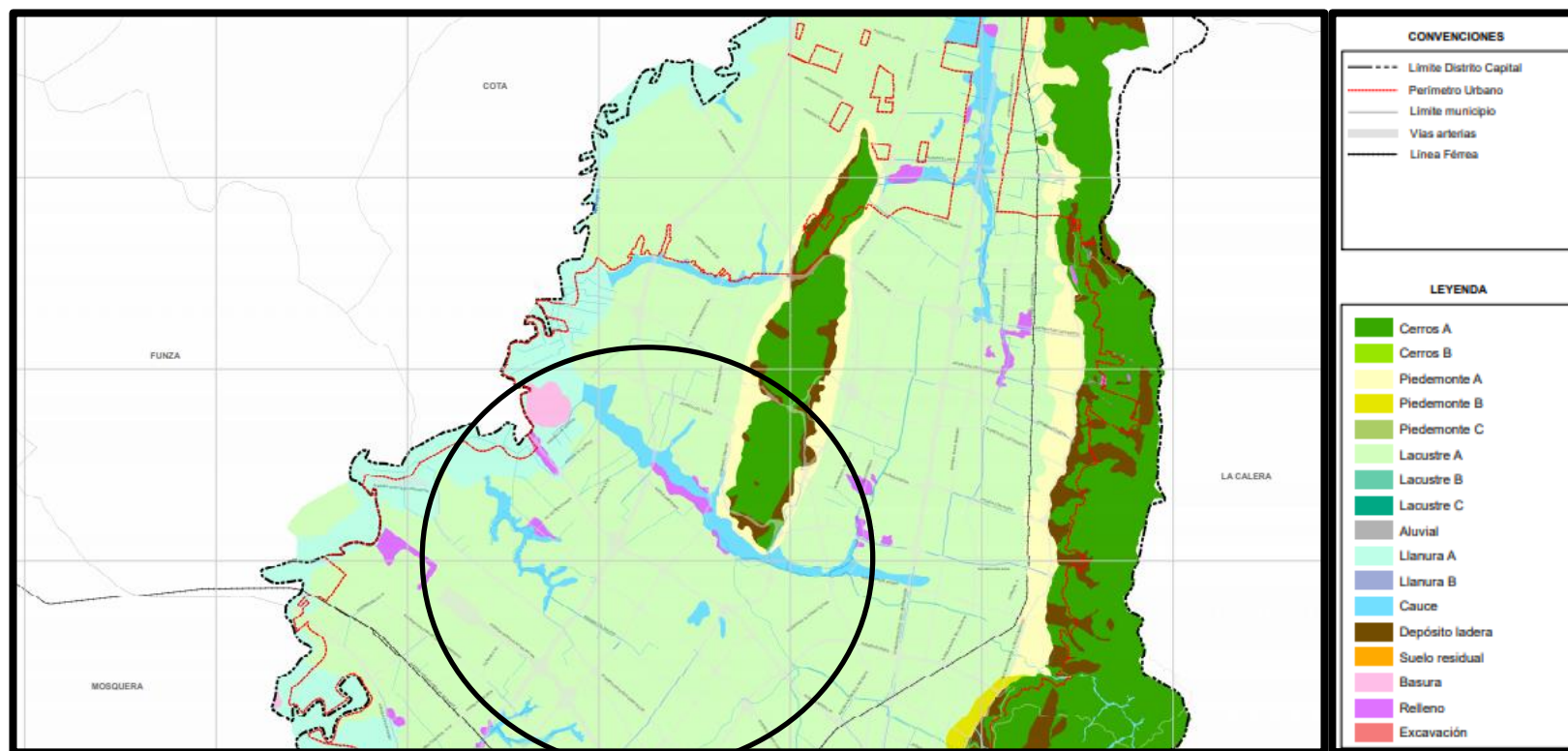
ANEXO 2. MAPA DE RESPUESTA SÍSMICA MICROZONIFICACIÓN

ANEXO 3. RESULTADOS DE LABORATORIO ESTUDIO DE SUELOS 1

ANEXO 4. RESULTADOS DE LABORATORIO ESTUDIO DE SUELOS 2

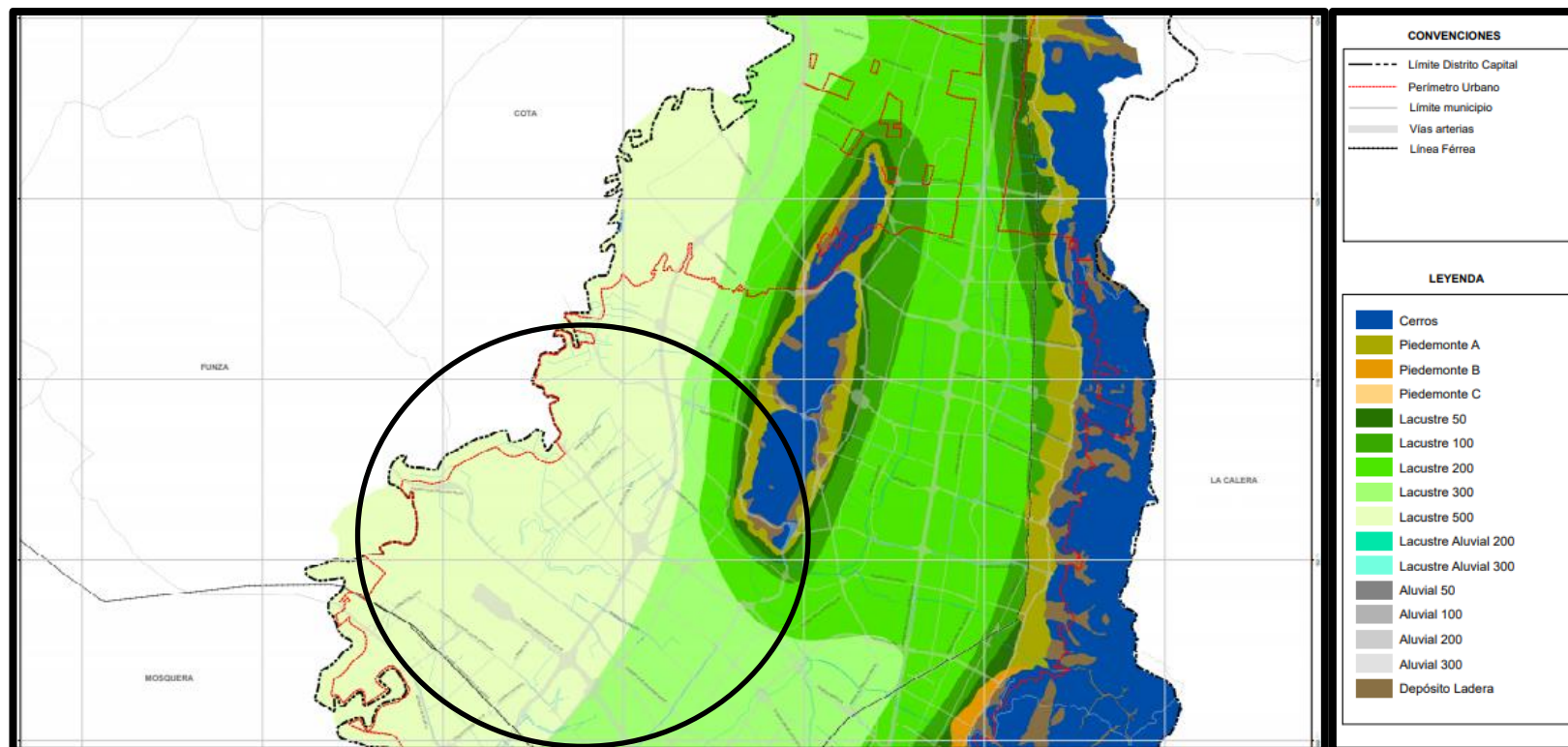
ANEXO 5. RESULTADOS DE LABORATORIO ESTUDIO DE SUELOS 3

ANEXO 1. MAPA DE ZONAS GEOLÓGICAS MICROZONIFICACIÓN



Fuente: Microzonificación sísmica de Bogotá

ANEXO 2. MAPA DE RESPUESTA SISMICA MICROZONIFICACIÓN



Fuente:

ANEXO 3. RESULTADOS DE LABORATORIO ESTUDIO DE SUELOS 1

resultados ensayos de laboratorio estudios de suelos 1										
Sondeo	número	Prof.	humedad	LL	LP	IP	qu RI	Cu RI	D HUM	D SEC
		M	%				KG/M2	KG/M2	TON/M3	TON/M3
1	1	0,7-1,2	101,8	123,5	49,4	74,1	0,7	0,75	1,33	0,65
1	2	1,3-1,8	120				0,27	0,3	1,31	0,69
1	3	1,8-2,3	70	106,8	31,5	75,3	0,67	0,6	1,61	0,94
4	1	0,5-1	53,8				1,49	0,5	1,31	0,85
4	2	1,8-2,3	66,8	93,7	32,2	61,5	0,7	1	1,59	0,95
4	4	5,5-6	75,6				0,39	0,4	1,36	0,77
4	6	8,5-9	112				0,14	0,3	1,35	0,63
5	1	0,5-1	78				1,62	175	1,42	0,79
5	2	1,4-2,0	61,1	79,6	32,6	47	0,48	0,75	1,62	1
5	3	4-4,5	111,7				0,8	0,5	1,42	0,67
5	6	8,5-9	119,2				0,24	0,2	1,37	0,62
8	1	0,5-1	79,6				3,75	1,25	1,57	0,87
8	2	1,5-2	116,2				0,71	0,55	1,63	0,75
8	3	4-4,5	110,5				0,71	0,4	1,4	0,66
8	4	5,5-6	128,1				0,43	0,25	1,52	0,66
8	6	8,5-9	138,3				0,24	0,15	1,39	0,58

Fuente: Propia

ANEXO 4. RESULTADOS DE LABORATORIO ESTUDIO DE SUELOS 2

resultados ensayos de laboratorio estudio de suelos 2							
profundidad	humedad	LL	LP	IP	qu RI	D HUM	D SEC
M					KG/M2	TON/M3	TON/M3
2,25	51,47	76	28	48	0,63	1,33	0,88
2,75	74,3	95	32	63	0,56	1,54	0,88
3,25	106,16	204	48	156	1,03	1,41	0,68
3,75	123,93	223	59	164	0,75	1,36	0,6

Fuente: Propia

ANEXO 5. RESULTADOS DE LABORATORIO ESTUDIO DE SUELOS 3

resultados ensayos de laboratorio estudio de suelos 3								
M	HUMEDAD		LÍMITES ATTERBERG			D HUM	D SEC	qu RI
PROF	PERF 1	PERF2	TON/M3	TON/M3	KG/M2	TON/M3	TON/M3	KG/M2
1,25	22,63	51,5	82,2	61,2	42,3	1,62	1,22	0,96
1,75	68,3	82,3	71,23	46,8	36,5	1,6	1,25	1
2,25	89,6	123	59,3	54,6	46,3	1,59	1,26	1,12
3,75	102,3	126,89	81,2	95,3	65,3	1,58	1,25	1,21

Fuente: Propia